

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

COMPARAISON DE L'ACTIVITÉ CÉRÉBRALE DE NOVICES ET D'EXPERTS EN
SCIENCES LORS DE LA RÉALISATION D'UNE TÂCHE EN PHYSIQUE
MÉCANIQUE IMPLIQUANT UNE CONCEPTION FRÉQUENTE

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN ÉDUCATION

PAR

LORIE-MARLÈNE BRAULT FOISY

OCTOBRE 2013

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

À mes parents

REMERCIEMENTS

Ce mémoire est le résultat d'un travail d'équipe considérable auquel de nombreuses personnes ont collaboré et contribué à leur façon. Je tiens à leur témoigner ici toute ma reconnaissance et ma considération.

Je tiens d'abord à remercier mon directeur de recherche, M. Steve Masson, professeur au département de didactique de l'Université du Québec à Montréal (UQAM). Dès le début, il a su m'accorder sa confiance et m'inclure dans des projets motivants et instructifs. Je le remercie pour la qualité de son encadrement, pour son écoute sincère, sa grande disponibilité, sa rigueur intellectuelle ainsi que ses conseils judicieux et toujours réfléchis. Sa détermination, son enthousiasme et sa motivation à vouloir développer le champ de la neuroéducation sont pour moi une source d'inspiration continue. Je lui suis très reconnaissante d'avoir accepté d'être mon directeur.

Je tiens également à remercier mon codirecteur de recherche, M. Patrice Potvin, professeur-chercheur au département de didactique de l'UQAM. Son expertise en didactique des sciences ainsi que ses commentaires constructifs et enrichissants ont fait de lui un excellent guide tout au long de la réalisation de ma maîtrise. Je le remercie d'avoir cru en ma capacité de mener à terme ce projet de recherche en neuroéducation et de m'avoir donné l'opportunité de le réaliser. Je le remercie également de m'avoir permis de m'intégrer à une équipe de recherche stimulante, l'EREST, envers laquelle j'ai développé un fort sentiment d'appartenance.

Travailler avec ces deux personnes fut une expérience des plus formatrice. Je me sens privilégiée d'avoir eu la chance d'être encadrée par ces chercheurs : ils constituent les piliers à la base de la réussite de ce projet.

Je tiens à adresser un remerciement particulier aux participants ayant accepté de prendre part à cette recherche. Leur curiosité, leur générosité et leur disponibilité m'ont d'abord étonnée, puis véritablement emballée.

Je tiens aussi à remercier M. Martin Riopel pour sa contribution lors de l'élaboration initiale de ce projet de recherche. Je souhaite également mentionner la contribution de M. Patrick Charland et de Mme Hélène Poissant, tous deux membres du comité d'évaluation de cette maîtrise, qui ont contribué, par la richesse et la justesse de leurs commentaires et de leurs critiques, à étoffer ce mémoire.

J'adresse de même un remerciement spécial à mes collègues et amis de l'EREST. Je me considère extrêmement chanceuse d'avoir pu évoluer au sein d'une équipe de recherche aussi dynamique et solidaire. À tous, vos conseils, votre écoute ainsi que votre support m'ont aidée à accomplir ce projet. Les expériences et discussions que nous avons eues et partagées me permettent de conserver d'excellents souvenirs de tout ce chemin parcouru. Dans le même ordre d'idées, je destine aussi un remerciement particulier à Lucile Rapin qui a fait preuve d'une grande générosité en me proposant de lire et de commenter plusieurs sections de ce mémoire.

Je tiens à souligner la contribution financière du Conseil de recherche en sciences humaines du Canada, du Fonds québécois de recherche sur la société et la culture ainsi que de l'UQAM qui ont contribué à la réalisation de cette recherche.

À mes amis de longue date qui ont été très présents dans ma vie durant ces deux années, merci de vous être intéressés à mon projet, de m'avoir questionnée, encouragée et soutenue. Votre aide me fut précieuse!

Finalement, je désire remercier mes parents, Manon Brault et Lucien Foisy, qui m'ont toujours encouragée à poursuivre mes études et à me dépasser, ainsi que mon conjoint, Steeve Esculier, pour son appui indéfectible et son support moral et émotionnel tout au long de la réalisation de ce projet. Ce sont leur écoute, leurs encouragements et leur support au quotidien qui m'ont permis de mener à terme cette recherche. Qu'ils trouvent ici le témoignage de mon éternelle gratitude.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES	xiii
LISTE DES TABLEAUX.....	xv
RÉSUMÉ.....	xvii
ABSTRACT.....	xix
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I	
PROBLÉMATIQUE.....	5
1.1 L'importance de l'éducation scientifique.....	5
1.2 Les conceptions fréquentes des élèves	6
1.3 Le changement conceptuel	11
1.4 Une approche neuroscientifique du changement conceptuel.....	14
1.5 Le rôle de l'inhibition	15
1.6 Positionnement de la présente recherche.....	17
1.7 Incidences possibles.....	18
CHAPITRE II	
CADRE THÉORIQUE.....	21
2.1 Le changement conceptuel	21
2.1.1 Les conceptions fréquentes des élèves.....	21
2.1.2 Le processus du changement conceptuel	24
2.1.3 Des modèles du changement conceptuel.....	26
2.1.4 Discussion des modèles présentés.....	32
2.1.5 L'évolution des conceptions des élèves à la suite d'un changement conceptuel	34

2.1.6 Études comportementales appuyant l'hypothèse de la coexistence	39
2.2 Le mécanisme cérébral de l'inhibition.....	48
2.2.1 Ce qu'est l'inhibition.....	48
2.2.2 Les régions cérébrales associées à l'inhibition.....	50
2.2.3 Le rôle de l'inhibition dans l'apprentissage	56
2.2.4 Le rôle de l'inhibition dans l'expertise en sciences.....	62
2.3 Hypothèses de recherche.....	69
 CHAPITRE III	
MÉTHODOLOGIE.....	71
3.1 Participants	71
3.1.1 Caractéristiques générales des participants sélectionnés.....	71
3.1.2 Caractéristiques spécifiques des participants novices et experts.....	73
3.1.3 Modalités de recrutement et échantillonnage	74
3.2 Collecte de données.....	78
3.2.1 Choix de la technique d'imagerie cérébrale : l'IRMf.....	78
3.2.2 Tâche cognitive.....	81
3.2.3 Réalisation de l'examen de neuroimagerie : description d'une séance type	85
3.3 Analyse des données	87
3.3.1 Étapes de prétraitement	88
3.3.2 Traitement des données	90
3.4 Considérations éthiques	92
3.4.1 Utilisation de l'IRMf.....	92
3.4.2 Obtention d'un consentement éclairé	93
3.4.3 Respect de la confidentialité et de l'anonymat.....	93
 CHAPITRE IV	
RÉSULTATS	95

4.1 Résultats comportementaux.....	95
4.2 Résultats neurologiques	99
CHAPITRE V	
INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS.....	109
5.1 Différences générales observées entre les experts et les novices	110
5.1.1 Différences au niveau des données comportementales	110
5.1.2 Différences au niveau des données neurologiques.....	111
5.1.3 Discussion des autres hypothèses envisageables	114
5.2 Expertise en mécanique et inhibition	116
5.2.1 Le cortex préfrontal dorsolatéral	117
5.2.2 Le cortex préfrontal ventrolatéral.....	118
5.2.3 Le cas particulier du cortex cingulaire antérieur.....	120
5.2.4 Discussion des autres hypothèses envisageables	125
5.2.5 Inhibition et réseaux de neurones.....	127
5.3 Incidences sur l'apprentissage et l'enseignement des sciences	131
5.3.1 Inhibition et changement conceptuel	131
5.3.2 Inhibition et enseignement des sciences	137
CHAPITRE VI	
CONCLUSION.....	141
APPENDICE A – QUESTIONNAIRE UTILISÉ LORS DE LA SÉLECTION DES PARTICIPANTS	147
APPENDICE B - FORMULAIRE DE DÉPISTAGE	153
APPENDICE C – FORMULAIRE DE CONSENTEMENT	155
APPENDICE D – PARAMÈTRES D'ACQUISITION DES IMAGES FONCTIONNELLE ET STRUCTURELLES	163
RÉFÉRENCES.....	165

LISTE DES FIGURES

2.1 Identification des régions cérébrales liées à l'inhibition.	55
3.1 Critères de sélection servant à définir la population de l'étude.	73
3.2 Appareil d'IRMf de l'Unité de neuroimagerie fonctionnelle appartenant au Centre de recherche de l'Institut universitaire de gériatrie de Montréal.	79
3.3 Types de stimuli en mécanique utilisés dans la tâche cognitive.	83
4.1 Régions cérébrales significativement plus activées chez les experts et les novices pour les trois types de stimuli présentés: contrôle, scientifiques et naïfs.....	102
4.2 Régions significativement plus activées chez les experts et les novices pour une condition par rapport à une autre.	108

LISTE DES TABLEAUX

2.1 Synthèse des différentes perspectives des modèles de changement conceptuel présentés.....	38
3.1 Synthèse des caractéristiques des deux groupes de participants.....	77
4.1 Taux de réussite des participants pour les trois types de stimuli présentés.	98
4.2 Temps de réaction des participants pour les trois types de stimuli présentés.	98
4.3 Régions cérébrales significativement plus activées chez les experts et chez les novices pour les différents types de stimuli présentés.	101
4.4 Régions cérébrales significativement plus activées chez les experts et les novices pour une condition par rapport à une autre.	105

RÉSUMÉ

Une importante littérature de recherche dans le domaine de la didactique des sciences révèle qu'il est difficile de faire émerger une compréhension satisfaisante de certains concepts scientifiques chez les élèves, car ces derniers entretiennent, en regard de différents phénomènes naturels, des conceptions fréquentes qui causent des interférences dans leur apprentissage. Ces conceptions fréquentes sont très persistantes parce qu'elles nécessitent la réalisation d'un changement conceptuel. Or, malgré les nombreux modèles théoriques du changement conceptuel proposés, aucun ne semble permettre de fournir une réponse consensuelle quant à ce qui advient des conceptions antérieures des élèves à la suite de la réalisation d'un changement conceptuel. Ces conceptions sont-elles supprimées, réorganisées, intégrées dans une nouvelle théorie plus large ou demeurent-elles présentes et coexistent-elles avec les nouveaux savoirs scientifiques?

La neuroéducation, une approche de recherche utilisant notamment des techniques d'imagerie cérébrale pour étudier certaines problématiques éducatives, permet d'apporter un éclairage supplémentaire à l'étude du changement conceptuel. En effet, de récentes études, notamment dans le domaine de l'électricité (Masson, 2012), pointent vers l'idée que le mécanisme cérébral de l'inhibition jouerait un rôle dans l'apprentissage des sciences et que les conceptions fréquentes des élèves ne disparaîtraient pas de leur cerveau lors d'un changement conceptuel. Ces derniers apprendraient plutôt à les inhiber afin de fournir une réponse scientifiquement correcte.

La physique mécanique étant une discipline scientifique pour laquelle les conceptions initiales des apprenants sont parmi les mieux connues et parmi les plus difficiles à changer, il apparaît pertinent de vouloir vérifier si l'inhibition joue également un rôle dans l'apprentissage de concepts propres à cette discipline. L'objectif principal de cette recherche est donc de vérifier si les experts en mécanique détiennent toujours de fausses conceptions qu'ils doivent inhiber pour répondre de façon scientifique. La principale hypothèse formulée est que les experts présenteront des activations plus fortes que les novices dans les régions cérébrales associées à l'inhibition, lorsqu'ils auront à répondre à des questions en mécanique impliquant la conception fréquente selon laquelle une balle plus lourde tombe plus rapidement qu'une balle plus légère.

Pour vérifier cette hypothèse, deux groupes de participants ont été comparés : un groupe de novices n'ayant pas réalisé de changement conceptuel (qui détiennent des conceptions en mécanique qui ne sont pas conformes au savoir scientifique) et un

groupe d'experts qui sont présumés avoir déjà réalisé un changement conceptuel (car ils ne détiennent pas de fausses conceptions en mécanique). Des images de l'activité cérébrale des participants ont été prises alors qu'ils réalisaient une tâche cognitive en physique mécanique dans un appareil d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf). La tâche consistait en la présentation de films dans lesquels deux balles de tailles différentes tombaient à des vitesses identiques ou différentes. Trois types de films étaient présentés : des films naïfs, non conformes aux lois du mouvement de Newton, des films newtoniens, conformes aux mêmes lois et des films contrôle. Les participants devaient juger si ces films étaient corrects ou incorrects. Les données permettent d'identifier les régions cérébrales qui sont plus activées lors de la réalisation de cette tâche chez les experts et chez les novices.

Les résultats montrent que les experts présentent des activations significativement plus prononcées pour des régions associées à l'inhibition, c'est-à-dire dans le cortex préfrontal ventrolatéral et dorsolatéral, lors de la présentation de films naïfs. Cela laisse entendre que leurs préconceptions en mécanique n'auraient pas été éradiquées ou transformées durant l'apprentissage : elles seraient plutôt demeurées présentes dans leur cerveau, mais ceux-ci auraient appris à les inhiber pour fournir une réponse scientifiquement correcte.

Cette recherche représente un pas de plus vers une meilleure compréhension du rôle de l'inhibition dans l'apprentissage des sciences. Les résultats obtenus montrent qu'il existe une différence au niveau des régions cérébrales activées entre les sujets détenant une compréhension conceptuelle plus grande en mécanique (les experts) et ceux ayant une moindre compréhension conceptuelle en mécanique (les novices). L'expertise en mécanique serait ainsi vraisemblablement liée à une meilleure capacité à inhiber ses conceptions spontanées. Pour cette discipline scientifique, un élève apprendrait donc à inhiber ses préconceptions pour réaliser un apprentissage plutôt que de les effacer, de les restructurer ou de les intégrer à une nouvelle théorie.

Mots-clés : changement conceptuel, éducation scientifique, inhibition, IRMf, neuroéducation.

ABSTRACT

An extensive research literature in the field of science education reveals that students often hold misconceptions about various phenomena. These misconceptions, generally opposed to the scientific knowledge taught in school, interfere with learning and therefore complicate the emergence of a true understanding. These misconceptions are known to be highly resistant and hard to change because they require the achievement of a conceptual change. However, despite the many theoretical models of conceptual change available, there is no consensus on the processes underlying conceptual change, and also, there is no consensual answer as to what happens to the initial conceptions of students after the completion of a conceptual change. Are these initial conceptions deleted, reorganized, replaced, integrated into a new, broader theory or do they remain present, therefore coexisting with new scientific knowledge?

Neuroeducation, a research approach using brain-imaging techniques to study some educational issues, can provide additional insight to the study of conceptual change. Indeed, recent studies, particularly in the field of electricity (Masson, 2012) point to the idea that the brain's mechanism of inhibition would play a role in learning science. Student conceptions would not disappear from their brain following a conceptual change : students would learn to inhibit them to provide a scientifically correct answer.

Since mechanics is a scientific discipline in which the initial misconceptions of learners are among the best known and the most frequent and persistent, it is of great interest to verify whether inhibition plays a role in learning concepts specific to this discipline. The main objective of this research is to determine whether experts in mechanics still hold misconceptions in their brain, which they have to inhibit in order to answer scientifically. The main hypothesis is that the experts will present stronger cerebral activations than novices in brain regions associated with inhibition when they have to answer questions involving the common mechanical conception « a heavier ball falls faster than a lighter ball ».

To test this hypothesis, two groups of participants were compared : a group of novices who made no conceptual change (who hold misconceptions in mechanics) and a group of experts who are presumed to have already made a conceptual change (because they do not have misconceptions in mechanics). Using functional magnetic resonance imaging (fMRI), images of the brain activity of the participants were taken while doing a cognitive task in mechanics. The task consisted of the presentation of films in which two balls of different sizes were falling at identical or different speeds.

Three types of films were shown to participants: naïve films, not in accordance with Newton's laws of motion, Newtonian films, which conform to the Newtonian laws, and control films. Participants were asked to judge if these films were correct or incorrect. The data collected allowed us to see the differences in brain activations between novices and experts and to identify the brain areas more activated for experts and novices for each type of stimuli.

The results show that experts activate, significantly more than novices, the areas associated with inhibition (dorsolateral and ventrolateral prefrontal cortex). This suggests that their preconceptions in mechanics have not been eradicated or transformed during learning: they would rather have remained present in their brains and they would have learned to inhibit it to provide a scientifically correct answer.

This research represents a step towards a better understanding of the role of inhibition in learning sciences. The results show that there is a difference in brain activations between subjects holding a greater conceptual understanding in mechanics (experts) and those with less conceptual understanding in mechanics (novices). Expertise in mechanics would be linked to a better ability to inhibit its spontaneous conceptions. For this scientific discipline, it seems that students would learn to inhibit their preconceptions to successfully learn rather than delete, or restructure them into a new theory.

Keywords : conceptual change, fMRI, inhibition, neuroéducation, science education.

INTRODUCTION

Depuis les années 1990, les connaissances relatives aux neurosciences ont fait leur apparition dans le discours de plusieurs disciplines, y compris l'éducation. Une nouvelle approche de recherche, la neuroéducation, a récemment vu le jour. Cette approche s'appuie sur le fonctionnement du cerveau ainsi que sur les techniques d'imagerie cérébrale pour chercher à expliquer ou à résoudre des problèmes qui sont propres au domaine de l'éducation. La neuroéducation vise donc à comprendre comment le cerveau fonctionne, apprend et réagit à l'enseignement.

Les résultats des premières recherches en ce domaine suscitent, depuis quelques années, un intérêt grandissant et il semble se dessiner un mouvement d'appui favorable à l'arrivée de cette nouvelle approche de recherche en éducation. Un rapport de l'Organisation de coopération et de développement économique (OCDE, 2007a), mentionne en effet que : « la neuroscience de l'éducation débouche sur des connaissances précieuses et neuves, qui permettent d'informer politiques et pratiques éducatives » (p. 18). On ajoute même qu'il est important de : « tenir compte de la neuroscience dans la conception des programmes et l'organisation de la scolarité » (p. 19).

À la différence des recherches habituellement menées en neurosciences, le but des recherches en neuroéducation n'est pas de prioriser essentiellement la compréhension même du fonctionnement du cerveau. Il s'agit plutôt d'aborder certains problèmes éducatifs à partir d'un niveau d'analyse inexploré : le niveau cérébral. En effet, il est aujourd'hui possible, de non seulement identifier les régions cérébrales mobilisées lors de la réalisation de tâches scolaires, mais également d'interpréter ce que signifient ces activations afin d'en tirer des connaissances susceptibles d'influencer

les pratiques enseignantes. En ce sens, la neuroéducation fournit déjà des réponses intéressantes à des questions particulièrement importantes pour le domaine de l'éducation, notamment au niveau de l'enseignement de la lecture et des mathématiques. En enseignement des sciences, il est reconnu que beaucoup d'élèves éprouvent des difficultés importantes à apprendre certaines notions scientifiques comme celle selon laquelle tous les objets, qu'ils soient légers ou lourds, tombent au sol avec la même accélération. Il semble que ces notions soient particulièrement difficiles à intégrer, car leur apprentissage nécessite un changement conceptuel. Or, le changement conceptuel demeure à ce jour un concept polysémique dont plusieurs aspects ne font pas consensus au sein de la communauté scientifique.

S'inscrivant dans le domaine de la neuroéducation, la présente recherche tentera de déterminer si les préconceptions des élèves demeurent présentes dans le cerveau de ces derniers à la suite d'un changement conceptuel. Une compréhension plus approfondie du processus de changement conceptuel et des mécanismes cérébraux qui le sous-tendent permettrait de mieux orienter l'enseignement des sciences, de faciliter l'apprentissage de concepts scientifiques réputés comme étant difficiles à acquérir et, ultimement, de développer une meilleure culture scientifique à l'école.

Le premier chapitre de ce mémoire pose la problématique de la recherche en fournissant un aperçu de la situation à analyser. Ce chapitre expose le problème de recherche et justifie la pertinence scientifique et sociale de l'étude. Il se termine par l'énoncé de la question de recherche. Le deuxième chapitre, le cadre théorique, présente les bases théoriques de la recherche et permet d'en définir les deux principaux concepts : le changement conceptuel et l'inhibition. Ce chapitre présente également les recherches les plus récentes en lien avec l'objet de la présente étude et se termine par l'énoncé des objectifs et des hypothèses de recherche. Le troisième chapitre détaille pour sa part le cadre méthodologique en précisant l'approche de recherche préconisée, les caractéristiques des participants, le type d'appareil

d'imagerie cérébrale choisi ainsi que les modalités de réalisation de la collecte et de l'analyse des données. Le quatrième chapitre fait état des résultats obtenus à la suite de l'analyse des données et le cinquième et dernier chapitre discute de l'interprétation de ces résultats de façon à répondre aux objectifs ainsi qu'à la question de recherche. Il aborde également les retombées pédagogiques possibles de cette recherche au niveau de l'apprentissage et de l'enseignement des sciences. Finalement, la conclusion résume les principaux résultats de recherche obtenus, fournit un aperçu des limites de la présente recherche et propose des pistes pouvant inspirer ou guider la tenue de recherches ultérieures.

CHAPITRE I

PROBLÉMATIQUE

1.1 L'importance de l'éducation scientifique

La science et la technologie occupent une place prépondérante dans la société actuelle. À l'échelle de la planète, pas une seule journée ne s'écoule sans qu'il ne soit utile de poser un regard scientifique sur la réalité : maladies, modifications génétiques, réchauffement climatique, énergie nucléaire, etc. Le développement d'une culture scientifique de base devient donc essentiel pour favoriser l'exercice de la responsabilité citoyenne et le développement de l'esprit critique (Viennot, 2008). Samson (2002, p. 114) va jusqu'à affirmer que : « la culture scientifique est essentielle au développement d'une société moderne, où l'innovation, la productivité et la compétitivité sont à l'honneur ». Dans un rapport portant sur l'évaluation des compétences en sciences, l'OCDE (2007b) ajoute qu'il importe que : « tous les individus, et pas seulement les futurs scientifiques et ingénieurs, possèdent un niveau plus élevé de compétences en sciences » (p. 122). Il semble d'autant plus important de miser sur le développement d'une bonne culture scientifique sachant que les difficultés en sciences que rencontrent les élèves ont un impact sur la perception qu'ils entretiennent à l'égard des sciences, sur leur attrait pour une future carrière scientifique ainsi que sur leur sentiment de compétence au regard de cette discipline (Masnick, Valenti, Cox, & Osman, 2009; OCDE, 2008).

L'école étant souvent le lieu où les jeunes entretiennent le contact le plus étroit avec les sciences, il semble pertinent de se questionner sur l'importance que doit prendre le développement de la culture scientifique au sein du milieu scolaire. Le Conseil de la

science et de la technologie du Québec (CST) affirme en ce sens qu' : « il convient de transmettre aux élèves le bagage de connaissances scientifiques et technologiques nécessaires à leur intégration réussie dans la société du savoir » (CST, 2004, p. xvi). Il apparaît alors que la « culture scolaire » ne saurait exister sans accorder une place importante aux sciences et technologies (Coq, 2003).

Au niveau de l'enseignement primaire, le programme de formation de l'école québécoise (2006), mentionne d'ailleurs que « l'apprentissage de la science et de la technologie est essentiel pour comprendre le monde dans lequel nous vivons » (p. 144). Parallèlement, le programme de science et technologie du secondaire vise à « développer chez les élèves une culture scientifique et technologique de base accessible à tous » (p. 268). La nécessité et la volonté d'enseigner les sciences et de contribuer au développement d'une culture scientifique semblent donc bien présentes au sein du milieu éducatif et l'école québécoise doit, conformément à sa mission, permettre aux élèves de s'intégrer à la société d'aujourd'hui en les aidant, entre autres, à acquérir plusieurs concepts scientifiques fondamentaux.

1.2 Les conceptions fréquentes des élèves

Afin que les élèves puissent développer une bonne culture scientifique et qu'ils aient, par la suite, confiance en leur capacité à accomplir des tâches de nature scientifique, il est essentiel qu'ils acquièrent une bonne compréhension des phénomènes qui leur sont présentés à l'école (Masnick et al., 2009). Cependant, une importante littérature de recherche dans le domaine de la didactique des sciences fait état de la difficulté à faire émerger une compréhension satisfaisante chez les élèves. Ceux-ci entretiendraient une multitude de conceptions fréquentes à propos de phénomènes naturels qui ne sont pas conformes aux savoirs scientifiques et qui causent des interférences dans l'apprentissage (Carey, 2000; Thouin, 1996, 2004a, 2004b;

Toussaint, 1991). Ces conceptions, souvent erronées, persisteraient même après que les élèves aient reçu un enseignement explicite des véritables conceptions scientifiques (Joshua & Dupin, 1993; Wandersee, Mintzes, & Novak, 1994). Elles « résistent aux efforts didactiques » (Astolfi, Peterfalvi, & Vérin, 2006, p. 46) et sont donc difficiles à faire évoluer (Legendre, 2002; Liu, 2001).

Sachant que les interventions pédagogiques en sciences se heurtent souvent à ces conceptions fréquentes, il importe conséquemment de prendre ces dernières en considération dans l'étude de l'apprentissage des sciences.

Plusieurs recherches ont été menées afin d'approfondir les connaissances sur la nature de ces conceptions. Certaines ont aussi répertorié les conceptions les plus fréquentes des élèves selon les différentes disciplines scientifiques (Thouin, 1996, 2004a, 2004b; Toussaint, 1991; Wandersee et al., 1994). En voici quelques exemples :

- les objets légers flottent et les objets lourds coulent;
- une balle plus lourde tombe plus vite qu'une balle plus légère;
- un seul fil électrique est nécessaire pour allumer une ampoule;
- il fait plus chaud l'été, car la Terre est plus proche du Soleil;
- c'est la vapeur d'eau qui rend le ciel bleu;
- l'eau en ébullition vive est plus chaude que l'eau en ébullition lente.

Ces conceptions auxquelles adhèrent plusieurs élèves ainsi que de nombreux adultes possèdent différentes appellations. On leur prête parfois une connotation plus négative en parlant de conceptions erronées (Toussaint, 2002), de conceptions primitives (Potvin, 1998), de conceptions naïves (Babai & Amsterdamer, 2008), de préconceptions (Ausubel, 1978; Lee & Byun, 2011; Samson, 2002) ou en insistant sur le fait qu'il s'agit des conceptions des élèves ou des apprenants (Giordan & de

Vecchi, 1987 ; Thouin, 1996). En anglais, le terme *misconceptions* (Nussbaum & Novick, 1982; Vosniadou, 1994) renvoie à l'idée de préjugé. À travers le choix de ces appellations, on met d'une certaine manière l'accent sur leur infériorité par rapport aux conceptions reconnues par la communauté scientifique. D'autres appellations mettent plutôt l'accent sur le statut intuitif de ces conceptions. Il est alors question de conceptions ou de règles intuitives (Babai, Sekal, & Stavy, 2010 ; diSessa, 1993; Tirosh & Stavy, 1999), de conceptions ou de systèmes explicatifs spontanés (Viennot, 1979), de conceptions inattendues (Potvin, 2011), etc. Des auteurs (Abimbola, 1988; Planinic, Boone, Krsnik, & Beilfuss, 2006) suggèrent également l'utilisation du terme « conceptions alternatives », une appellation qu'ils considèrent comme étant plus inclusive. Ces différentes façons de nommer ces conceptions renvoient cependant toutes à l'idée d'un décalage entre les conceptions des élèves et les conceptions à enseigner. Dans la présente recherche, plusieurs appellations seront utilisées indistinctement, dont celle de *conception fréquente*, moins utilisée dans la littérature, qui met l'accent sur le fait que ces conceptions sont souvent largement répandues et clairement identifiées par la littérature de recherche. Il sera entendu que ces différentes appellations supposent que la conception soit en rupture avec les conceptions scientifiques prévues au programme.

Pour bien comprendre l'origine des conceptions fréquentes, il est possible de situer le problème dans une perspective constructiviste. En effet, selon cette perspective, l'élève n'arrive pas en classe « la tête vide » et les connaissances préalables qu'il détient auront un impact sur ses apprentissages ultérieurs. Déjà Piaget, vers 1927, détaillait le développement des opérations logico-mathématiques de l'enfant et montrait que ce dernier, avant même son entrée à l'école, possédait de nombreuses représentations spontanées du monde qui l'entoure. Selon Toussaint (2001), ces préconceptions de l'élève s'expliqueraient par le fait que « l'exploration de son

environnement lui offre l'occasion de construire ses propres schèmes, d'organiser ses structures mentales et de faire évoluer ses conceptions » (p. 3).

Potvin (2011, p. 106) affirme ainsi :

les élèves semblent spontanément chercher à produire des liens et établir des parentés ou des incompatibilités entre les phénomènes ou les objets, à trouver des invariants, permettant des prédictions ultérieures et des actions effectives sur le monde.

En ce sens, certaines idées qui ne sont pas en accord avec les conceptions reconnues par la communauté scientifique peuvent s'avérer suffisamment efficaces dans de nombreux contextes. C'est donc vraisemblablement cette efficacité, et le sentiment de confiance qu'elle procure aux élèves, qui rendent ces conceptions fréquentes si résistantes au changement. La ténacité des conceptions s'expliquerait ainsi par leur efficacité logique, c'est-à-dire par leur capacité à expliquer correctement un phénomène dans un contexte précis (de Vecchi & Giordan, 1994), ou encore psychologique. Celles-ci répondraient donc à un impératif de viabilité et non de vérité (Laroche & Désautels, 1992, p. 67).

Ces préconceptions, ce déjà-là conceptuel, peuvent conséquemment faire obstacle à l'apprentissage et au développement d'une culture scientifique. Sans déprécier ces conceptions fréquentes, qui constituent la plupart du temps un cadre de référence viable pour l'élève, il importe plutôt de les prendre en considération afin d'optimiser l'enseignement des savoirs scientifiques, tels qu'ils sont énoncés dans les programmes de formation.

Les chercheurs font consensus sur un certain nombre de points en lien avec ces conceptions. D'abord, ils s'entendent sur le fait que les élèves possèdent souvent des

conceptions fréquentes dans de nombreux domaines scientifiques, comme la physique, la biologie et la chimie, et ce, avant même d'avoir reçu un enseignement sur ces sujets (Wandersee et al., 1994). De plus, ces conceptions leur apparaissent également difficiles à faire évoluer (Confrey, 1990; Wandersee et al., 1994) et elles demeurent présentes et utilisées par les élèves, souvent même après un enseignement des véritables conceptions scientifiques. Il est d'ailleurs assez fréquent de relever, dans les propos d'adultes cultivés, des conceptions inappropriées que plusieurs années d'enseignement n'ont pas réussi à déraciner. de Vecchi et Giordan (1994, p. 29) estiment en ce sens que les conceptions fréquentes constituent un « phénomène général », car les mêmes conceptions sont parfois présentes à différents âges.

Ce phénomène de persistance des conceptions apparaît particulièrement prononcé pour le domaine de la physique mécanique. En effet, il s'agit d'une discipline scientifique pour laquelle les conceptions initiales des apprenants sont parmi les mieux connues et parmi les plus difficiles à changer (Brown & Hammer, 2008). Plus de 25 % des étudiants de première année du baccalauréat en physique croient ainsi qu'une balle de métal de la même grosseur qu'une balle en plastique tombera plus rapidement au sol (dans un environnement sans résistance de l'air), et ce, même après un enseignement formel donné sur ce sujet (Wandersee et al., 1994).

L'étude de l'importance et de la persistance de ces conceptions fréquentes est souvent envisagée et présentée selon deux perspectives distinctes. D'un côté, certains auteurs comme Bachelard (1938) ou Larochelle et Désautels (1992) proposent de concevoir l'apprentissage des concepts scientifiques dans une perspective de rupture par rapport aux conceptions fréquentes, en termes d'obstacles à surmonter. D'autres, comme diSessa (1993, 1998), croient plutôt qu'il faut le considérer dans une perspective de continuité et que les nouveaux apprentissages doivent prendre appui sur les préconceptions des élèves. Ces préconceptions sont alors perçues comme des points

d'ancrage. Le choix de l'une de ces deux perspectives peut amener à privilégier des stratégies pédagogiques différentes (Legendre, 2002). de Vecchi et Giordan (1994) mentionnent, quant à eux, que toutes les pédagogies qui agissent seulement « avec » ou « contre » les représentations des apprenants s'avèrent insuffisantes. Il semble ainsi nécessaire de « faire avec pour aller contre » (de Vecchi & Giordan, 1994, p. 91). C'est alors que se pose la question de l'évolution des conceptions des élèves.

1.3 Le changement conceptuel

L'intérêt grandissant pour la compréhension des conceptions fréquentes des élèves a donné naissance au champ de recherche du changement conceptuel. À ce jour, plusieurs chercheurs ont élaboré des modèles afin de représenter le processus du changement conceptuel en l'inscrivant dans une perspective constructiviste du développement des connaissances. Ce processus peut se définir comme étant le passage d'une connaissance intuitive vers une connaissance scientifique correspondant aux savoirs et aux concepts scientifiques abordés en classe (Thouin, 1996). Toutefois, il semblerait que le changement conceptuel soit bien souvent, en définitive, incomplet ou qu'il ne soit tout simplement pas réussi (Tsai & Wen, 2005). L'importance et la « résistance » des conceptions antérieures des élèves (Joshua & Dupin, 1993) feraient du changement conceptuel un processus difficile à réaliser. diSessa (2006) en parle notamment comme d'un « long parcours » et affirme que lorsque l'on confronte les élèves avec des notions allant à l'encontre de leurs conceptions, le changement conceptuel ne devient possible qu'après de nombreuses interventions répétées sur une longue période.

Cependant, il n'existe pas de modèle du changement conceptuel faisant consensus au sein de la communauté scientifique (diSessa, 2006, 2008). Ainsi, pour certains (Vosniadou, 1994), les élèves possèderaient des cadres théoriques naïfs (formés de

présuppositions leur permettant d'appréhender et de comprendre le monde qui les entoure) qui ne seraient pas conformes aux savoirs scientifiques. Pour d'autres (diSessa, 1993), la connaissance des élèves serait morcelée et ces derniers ne possèderaient pas de théories bien organisées. Ils formuleraient plutôt leurs conceptions à partir d'habitudes interprétatives et élémentaires. Les chercheurs ne s'entendent donc pas sur la nature exacte du changement conceptuel.

diSessa (2006, p. 266) affirme en ce sens :

There are, in fact, no widely accepted, well-articulated, and tested theories of conceptual change. Instead, the field consists of multiple perspectives that combine many commonsense and theoretical ideas in kaleidoscopic fashion.

Outre ce manque de cohésion en regard de la nature même du changement conceptuel, les modèles théoriques proposés ne permettent pas non plus de fournir d'emblée une réponse commune et partagée quant à ce qui advient des conceptions antérieures des élèves à la suite de la réalisation d'un changement conceptuel. Certains chercheurs croient que les conceptions fréquentes des élèves sont remplacées (Nussbaum & Novick, 1982; Posner, Strike, Hewson, & Gertzog, 1982) ou réorganisées à la suite d'un changement conceptuel (Vosniadou, 1994; Carey, 2009). Selon cette idée, l'accès aux connaissances antérieures des élèves serait donc impossible après un changement conceptuel. Toutefois, d'autres chercheurs croient plutôt que les conceptions scientifiques jouent le rôle d'un masque qui couvre les conceptions fréquentes des élèves plutôt que de les remplacer (Bélanger, 2008; Dunbar, Fugelsang, & Stein, 2007; Mortimer, 1995; Ohlsson, 2009; Shtulman & Varcarel, 2012; Solomon, 1983, 1984). Selon ces chercheurs, les conceptions fréquentes continueraient donc à coexister avec les savoirs scientifiques à la suite d'un changement conceptuel et elles demeureraient accessibles à l'élève. Cette vision sous-entend que les enseignants de science auraient alors une double tâche à accomplir : ils

devraient non seulement aider leurs élèves à apprendre de nouveaux concepts scientifiques, mais ils devraient également aider ces derniers à apprendre à bloquer (ou contrôler) leurs anciennes théories non scientifiques pour parvenir à raisonner correctement dans certains contextes précis.

Ces deux visions de l'évolution des conceptions des élèves impliquent des considérations pratiques différentes. En effet, un enseignant dont l'objectif est de supprimer ou de transformer la conception de son élève n'agira vraisemblablement pas de la même manière et ne mettra pas en place les mêmes stratégies pédagogiques, qu'un enseignant dont l'objectif est de faire acquérir à l'élève une nouvelle conception scientifique, tout en l'aidant à contrôler sa tendance spontanée à utiliser son système explicatif initial. Il semble donc important de parvenir à déterminer quelle position adopter de façon à orienter adéquatement notre façon d'enseigner. Il devient alors primordial d'étudier ce qui advient des conceptions fréquentes des élèves à la suite d'un changement conceptuel. Ces conceptions sont-elles supprimées, réorganisées, intégrées dans une nouvelle théorie plus large ou demeurent-elles présentes et coexistent-elles avec les nouveaux savoirs scientifiques?

Au niveau méthodologique, cette question pose un défi aux approches traditionnelles de recherche. En effet, dans l'optique où il y aurait coexistence, les élèves ayant réalisé un changement conceptuel ne seraient probablement pas conscients qu'ils détiennent toujours certaines préconceptions. Si on leur présentait un questionnaire portant sur différents phénomènes scientifiques, il y aurait de fortes chances qu'ils répondent correctement aux questions qui leur sont posées et si on les interrogeait dans le cadre d'un entretien d'explicitation, ils diraient probablement qu'ils n'entretiennent pas les préconceptions présumées. Cela ne serait pas surprenant puisqu'ils auraient réalisé un changement conceptuel et donc, en quelque sorte,

développé une certaine expertise en regard des notions qui leur auraient été enseignées.

La difficulté actuelle à vérifier cette hypothèse de coexistence semble témoigner des limites des approches méthodologiques actuellement utilisées dans l'étude du changement conceptuel. Il apparaît donc indispensable d'approfondir les recherches actuelles en utilisant de nouveaux instruments de mesure et en explorant des voies qui n'avaient pas été prises en compte auparavant. La présente étude propose conséquemment d'étudier la question sous l'angle des neurosciences.

1.4 Une approche neuroscientifique du changement conceptuel

Depuis quelques années, une nouvelle approche de recherche se situant au croisement des neurosciences cognitives et du domaine de l'éducation a fait son apparition : la neuroéducation. En utilisant des techniques d'imagerie cérébrale de pointe permettant de voir le cerveau de l'apprenant en action, la neuroéducation ajoute la variable de l'activité cérébrale dans la recherche en éducation et porte ainsi un regard nouveau sur la compréhension de l'apprentissage et, par voie de conséquence, sur la pratique même de l'enseignement.

De façon plus spécifique, cette récente approche de recherche peut apporter un éclairage supplémentaire à l'étude du changement conceptuel. En effet, si les conceptions antérieures des élèves ne sont jamais supprimées de leur cerveau et qu'elles coexistent plutôt avec les savoirs scientifiques de ces derniers (Kelemen, Rottman, & Seston, 2012; Shtulman & Varcarel, 2012), il semble alors que pour répondre adéquatement à une question en science, un élève devrait apprendre à mobiliser ses conceptions scientifiques, et surtout à ne pas mobiliser ses conceptions

fréquentes (c'est-à-dire à sélectionner les premières et à « ignorer » les deuxièmes), dans le but de fournir une réponse correcte.

Or, grâce au développement de l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) et de nos connaissances sur le fonctionnement du cerveau, il est maintenant possible de vérifier ce qui se passe, au niveau cérébral, lorsqu'un élève répond à des questions en science. Il a été démontré que les neurones responsables d'une même fonction ont tendance à être regroupés au même endroit dans le cerveau. On nomme ce phénomène la spécialisation fonctionnelle (Ward, 2010). Ainsi, lorsqu'un élève réalise une tâche scolaire, certaines régions de son cerveau deviennent plus fortement activées, selon la nature de la tâche réalisée. Le degré d'activité de ces régions cérébrales peut ainsi être corrélé avec certaines fonctions exécutives qui entrent en jeu dans l'apprentissage telles que la planification, l'anticipation, la mémoire de travail, la résolution de problèmes, l'attention, le contrôle cognitif, l'inhibition, etc. Il est donc possible de créer un pont entre le niveau cérébral (activations localisées à certains endroits du cerveau) et le domaine de l'éducation (fonctions en lien avec les régions activées).

Si les élèves « experts » parviennent réellement à inhiber leurs conceptions fréquentes pour répondre de façon scientifique, il serait alors possible de le voir à l'aide de l'IRMf, car cette capacité à inhiber se refléterait par une plus forte activation des régions cérébrales associées à l'inhibition.

1.5 Le rôle de l'inhibition

Il est possible de concevoir l'inhibition comme étant un mécanisme cérébral d'adaptation (Houdé et al., 2000) lié au contrôle ou à la désactivation d'une région cérébrale par une autre région cérébrale (Masson, 2012). De plus, l'inhibition se

caractérise par l'activation de régions du cortex préfrontal (Houdé et al., 2000, 2001). Cependant, peu de recherches se sont véritablement penchées sur le rôle de l'inhibition cérébrale dans l'apprentissage des sciences et les résultats obtenus reposent donc sur un nombre restreint d'études.

Une recherche pilote (Dunbar et al., 2007) a porté spécifiquement sur le rôle du mécanisme cérébral de l'inhibition en sciences. Les résultats obtenus tendent à démontrer qu'un élève apprendrait en effet à inhiber ses connaissances antérieures pour réaliser un changement conceptuel plutôt que de les effacer, de les restructurer ou de les absorber dans une nouvelle théorie. Le processus de changement conceptuel, que l'on percevait principalement comme une réorganisation conceptuelle, se définirait davantage comme le développement de la capacité à inhiber ses conceptions spontanées qui sont inappropriées. Le rôle de l'inhibition semble donc être important dans le processus de changement conceptuel en sciences.

Plus récemment, une recherche en neurodidactique des sciences (Masson, 2012; Masson, Potvin, Riopel, Brault Foisy, & Lafortune, 2012) s'est penchée sur les mécanismes cérébraux sous-tendant l'expertise en électricité. Les résultats de cette recherche appuient ceux obtenus précédemment en ce qui a trait au rôle de l'inhibition dans l'apprentissage des sciences. En effet, l'expertise en électricité se caractériserait entre autres par le développement de cette capacité à inhiber, c'est-à-dire par cette faculté à activer certaines régions cérébrales responsables de l'inhibition.

Ces premiers résultats semblent indiquer que l'inhibition jouerait un rôle majeur dans l'apprentissage des sciences et que les conceptions fréquentes qu'entretiennent les élèves en regard de différents phénomènes scientifiques demeurent bel et bien encodées dans leurs réseaux neuronaux, même après qu'un changement conceptuel ait été réalisé.

1.6 Positionnement de la présente recherche

La présente recherche s'inscrit dans le domaine de la neuroéducation et plus spécifiquement, dans celui de la neurodidactique des sciences qui fait l'étude des mécanismes cérébraux impliqués dans l'apprentissage et l'enseignement des sciences. Elle se situe plus précisément dans la continuité de la recherche de Masson (2012) qui a fait l'étude des caractéristiques cérébrales de l'expertise en électricité, parce que les éléments méthodologiques de la présente recherche reprennent essentiellement ceux élaborés par celui-ci. Cependant, elle se penche sur les mécanismes cérébraux en jeu pour une discipline scientifique tout autre, celle de la physique mécanique. Le choix de cette discipline est pertinent, car, d'une part, les résultats préliminaires de la recherche de Dunbar et al. (2007) ont permis de poser l'hypothèse d'un lien entre inhibition et expertise en mécanique, hypothèse qu'il apparaît maintenant essentiel de vérifier. D'autre part, la mécanique est un domaine dont les conceptions fréquentes sont très bien connues, répertoriées, et réputées comme étant parmi les plus tenaces (Brown & Hammer, 2008), ce qui rend la tenue d'une recherche portant sur cette discipline encore plus pertinente et profitable pour le milieu de l'éducation.

En somme, considérant que l'éducation scientifique revêt une grande importance dans la société actuelle, que les élèves entretiennent des conceptions fréquentes qui font souvent obstacle à leur apprentissage de concepts scientifiques et qu'il n'existe pour le moment aucune réponse claire quant à ce qu'il advient des conceptions fréquentes des élèves à la suite d'un changement conceptuel, il apparaît pertinent d'étudier ce processus sous un angle différent : celui de la neuroscience. Comme le rôle de l'inhibition dans le processus de changement conceptuel semble prometteur, il est important de chercher à l'approfondir. Or, la recherche pilote de Dunbar et de ses collaborateurs (2007), bien qu'elle mette en lumière cette nouvelle hypothèse quant au rôle de l'inhibition, omet de présenter plusieurs informations méthodologiques

importantes, sans lesquelles il est difficile de s'appuyer avec certitude sur les résultats obtenus. La recherche de Masson (2012) permet, quant à elle, d'identifier les mécanismes cérébraux impliqués dans l'apprentissage de l'électricité et de lier clairement l'expertise en électricité à la capacité à inhiber. Or, on ne sait pas encore si les mécanismes cérébraux de l'inhibition en lien avec l'expertise en électricité sont aussi liés à l'expertise dans d'autres domaines scientifiques. Sachant que la physique mécanique constitue un domaine pour lequel les conceptions des élèves sont parmi les mieux documentées et les plus difficiles à changer (Brown & Hammer, 2008), il semble pertinent de se pencher sur les mécanismes cérébraux, ou les régions cérébrales, qui sous-tendent l'expertise en physique mécanique.

La question de recherche à laquelle nous tenterons de répondre est donc la suivante : est-ce que les experts en physique mécanique possèdent toujours de fausses conceptions qu'ils doivent inhiber?

1.7 Incidences possibles

Les incidences possibles d'une réponse positive à cette question laissent entrevoir une nouvelle façon de concevoir le processus de changement conceptuel, qui ne serait en soi jamais complètement terminé.

Cette recherche représente un pas de plus vers une meilleure compréhension du rôle de l'inhibition dans l'apprentissage des sciences. Elle permettra notamment de vérifier si l'inhibition est impliquée dans l'apprentissage de la physique mécanique et de contribuer à confirmer le rôle de ce mécanisme dans l'expertise scientifique. Si l'hypothèse de l'inhibition se révèle exacte, il faudrait alors revoir notre façon de concevoir l'enseignement des sciences. Cet enseignement ne devrait pas viser le rejet, l'effacement, le remplacement ou la restructuration des préconceptions des élèves,

mais plutôt le développement de la capacité à les inhiber, étant donné qu'elles n'auraient pas disparu de leur cerveau durant le processus de changement conceptuel.

Somme toute, cette recherche, par le biais d'une meilleure compréhension du processus de changement conceptuel et des moyens à privilégier pour le favoriser, pourra permettre, à plus long terme, le développement d'une meilleure culture scientifique.

CHAPITRE II

CADRE THÉORIQUE

Ce chapitre présente les principaux concepts sous-jacents à cette recherche. Dans un premier temps, le concept du changement conceptuel est étudié. L'origine de ce concept ainsi que plusieurs définitions de ce dernier sont présentées et les principaux modèles de changement conceptuel élaborés par différents chercheurs sont également discutés. Les limites des connaissances sur le changement conceptuel sont mises en évidence et les résultats de recherches pointant vers l'idée d'une coexistence des conceptions sont finalement présentés. Puis, dans un deuxième temps, le concept d'inhibition est abordé. Ce concept est d'abord décrit et défini, et les régions cérébrales liées à l'inhibition sont ensuite identifiées. Le rôle de ce mécanisme cérébral dans l'apprentissage en général et plus précisément dans l'expertise en sciences est finalement discuté. Le chapitre se termine par la présentation des hypothèses de recherche.

2.1 Le changement conceptuel

2.1.1 Les conceptions fréquentes des élèves

Tel que mentionné dans le chapitre 1, les conceptions fréquentes des élèves en sciences interfèrent souvent avec les conceptions scientifiques à enseigner. En effet, l'élève ne se présente pas en classe « la tête vide ». Il apporte avec lui un bagage de connaissances et d'expériences qui ont marqué son existence. Déjà en 1938, Bachelard le mettait en évidence : « Quand il se présente à la culture scientifique, l'esprit n'est jamais jeune. Il est même très vieux, car il a l'âge de ses préjugés ».

Ausubel (1968) affirmait également : « If I had to reduce *all* of educational psychology to just a single principle, I would say this: Find out what the learner already knows and teach him or her accordingly » (p. 337).

À la fin des années 70, les chercheurs se sont alors concentrés sur l'étude de ces conceptions fréquentes. Ils en ont fait la recension et l'analyse pour plusieurs disciplines scientifiques (Murphy & Alexander, 2008; Thouin, 1996, 2004a, 2004b, 2005; Toussaint, 1991; Wandersee et al., 1994) chez des élèves de différents niveaux scolaires et ils se sont intéressés à leur origine (Bélanger, 2008).

Selon Giordan et de Vecchi (1987), les conceptions fréquentes proviendraient d'une activité de construction mentale du réel et elles auraient à la fois une genèse individuelle et sociale. Elles découleraient de processus d'élaboration et de structuration personnels qui seraient influencés par différents aspects sociaux tels que l'éducation parentale, les médias, etc. Elles prendraient donc racine dans l'expérience même de l'élève. Par ailleurs, selon ces mêmes auteurs :

malgré leurs origines et leur mode de fonctionnement disparates, les conceptions des apprenants, aussi morcelées soient-elles, ne constituent pas un ramassis aléatoire ou anarchique. Elles correspondent à un tout, plus ou moins structuré et durable, possédant sa logique ou du moins sa cohérence propre (p. 91).

En effet, ces conceptions s'avèrent être des systèmes d'explication fonctionnels et efficaces dans plusieurs contextes et c'est vraisemblablement cette pertinence partielle qui explique, du moins en partie, pourquoi les élèves s'y accrochent avec autant de ténacité. Ces conceptions ne peuvent être traitées comme de simples erreurs, car elles possèdent une certaine utilité et elles poussent à l'action.

Potvin (2008) soutient ainsi :

S'il fallait vivre [...] dans un doute généralisé et se mettre à hésiter chaque fois qu'il faut prendre une décision, s'il fallait attendre de rassembler toutes les certitudes objectives avant d'agir, on se condamnerait vraisemblablement à l'immobilisme [...] (p. 104).

Selon Houdé (2009), l'enfant, mais aussi l'adulte, privilégient souvent l'utilisation d'une heuristique, laquelle est « une stratégie très rapide, très efficace - donc économique pour l'enfant - qui marche très bien, très souvent, mais pas toujours » (p. 173). Les préconceptions des élèves, ou leurs heuristiques, ne menant pas constamment à des raisonnements qui sont scientifiquement corrects, il faudrait donc, dans certains contextes, apprendre à les surmonter pour réaliser un changement conceptuel et accéder à un mode de raisonnement scientifique.

Legendre (2002) note ainsi l'existence d'un certain paradoxe dans l'apprentissage et met de l'avant une double perspective : celle de la continuité et celle de la rupture. D'une part, il y aurait donc continuité, car le changement conceptuel implique l'existence d'un pont entre les connaissances antérieures et les connaissances nouvelles sans lequel, selon Legendre (2002), aucun apprentissage ne serait possible. D'autre part, il y aurait rupture, car il existe un écart considérable entre les connaissances initiales élaborées par l'apprenant et les savoirs scientifiques qui lui sont enseignés. Les conceptions initiales faisant souvent obstacle à l'apprentissage, l'élève doit éventuellement parvenir à les surmonter pour réaliser un changement conceptuel.

Or, les préconceptions des élèves sont tenaces et résistent souvent même après un enseignement formel des conceptions scientifiques reconnues (Wandersee et al., 1994). Par exemple, une recherche de Périago et Bohigas (2005), menée auprès

d'étudiants universitaires de deuxième année en ingénierie, a permis de constater que plusieurs de ces étudiants détenaient encore de nombreuses conceptions inappropriées en électricité, malgré le fait qu'ils aient déjà reçu un enseignement à ce sujet. Bachelard (1938) disait en ce sens : « Il vient un temps où l'esprit aime mieux ce qui confirme son savoir que ce qui le contredit, où il aime mieux les réponses que les questions. Alors l'instinct conservatif domine » (p. 15).

D'une part, il semble donc qu'il faille tenir compte des conceptions fréquentes qu'entretiennent les apprenants, car elles constituent leur cadre de référence central, leur principal modèle explicatif, et elles sont les « structures d'accueil » (Legendre, 2002) des concepts scientifiques qui sont enseignés. D'autre part, selon Bêty (2009) :

savoir qu'il faut enseigner à partir des conceptions initiales des élèves représente en soi le point de départ du changement conceptuel, mais encore faut-il comprendre ce processus de changement et identifier de quelle(s) façon(s) il est possible de faire progresser l'élève vers l'appropriation de concepts scientifiques (p. 10).

Vers le début des années 1980, les chercheurs ont donc voulu dépasser l'identification des conceptions fréquentes des élèves et ils ont tenté de comprendre plus en détail le processus par lequel les élèves évoluent de leur conception initiale vers une conception scientifique.

2.1.2 Le processus du changement conceptuel

Les recherches sur le changement conceptuel s'inscrivent dans la continuité des travaux de Piaget (diSessa, 2006; Legendre, 2002; Posner et al., 1982) qu'on associe au courant constructiviste selon lequel les nouveaux savoirs sont construits à partir des connaissances antérieures de l'apprenant. Le constructivisme est né en réaction au courant behavioriste qui considérait principalement l'apprentissage comme une

association entre un stimulus et une réponse. Les recherches sur le changement conceptuel sont donc en continuité avec les travaux de Piaget parce qu'elles étudient l'apprentissage des sciences selon une perspective constructiviste où l'apprentissage résulte de l'interaction entre les anciennes conceptions de l'apprenant et les nouvelles informations qui lui sont présentées. L'apprentissage y est vu comme un processus actif et les réseaux de savoirs sont considérés comme étant en constante reconstruction. De plus, la distinction entre l'assimilation et l'accommodation, deux concepts développés par Piaget, est l'un des fondements des modèles du changement conceptuel (Posner et al., 1982) et l'on considère l'accommodation comme en étant l'archétype (c'est-à-dire le concept qui en est à l'origine).

Il est également possible d'affirmer que les recherches sur le changement conceptuel découlent principalement des travaux du philosophe et historien des sciences Thomas Kuhn qui, dans sa théorie des révolutions scientifiques (1970), a décrit le processus de changement de pensée au sein d'une même communauté scientifique. Un parallèle important peut être tracé entre le phénomène des révolutions scientifiques décrit par Kuhn, entraînant un changement de paradigme, et le « renversement » des préconceptions des élèves lors de l'apprentissage.

Plusieurs auteurs ont proposé des définitions du processus de changement conceptuel. De façon générale, Legendre (2005) définit le changement conceptuel comme étant une « modification qui se produit dans la représentation et l'organisation de la connaissance chez un individu » (p. 205). Bélanger (2008) soutient également que : « le processus de changement conceptuel consiste en une altération de la structure cognitive initiale de l'élève débouchant sur une structure cognitive finale correspondant idéalement aux savoirs scientifiques visés » (p. 66). Ces deux définitions mettent donc de l'avant le fait que le changement conceptuel implique

nécessairement un changement sur le plan cognitif, l'état initial étant différent de l'état final.

Potvin précise, en parlant spécifiquement de l'enseignement des sciences, que « le changement conceptuel vise, par le biais de stratégies pédagogiques tel le conflit cognitif, à faire passer l'élève d'une conception scientifique à efficacité restreinte à une conception scientifique à efficacité élargie » (1998, cité par Legendre, 2005, p. 205). Dans le même sens, Thouin (1996) parle du changement conceptuel comme d'un processus par lequel les conceptions inappropriées des élèves se modifient afin d'être en accord avec les savoirs et les concepts scientifiques qui sont abordés en classe. Duit affirme de façon similaire : « conceptual change denotes learning pathways from students' pre-instructional conceptions to the science concepts to be learned » (1999, cité par Duit & Treagust, 2003, p. 673). Ces autres définitions mettent l'accent sur le processus même de changement et font ressortir l'idée d'une route, d'un parcours à accomplir, pour que se produise ce changement. Bêty (2009) distingue ainsi trois composantes au changement conceptuel, soit les conceptions initiales des apprenants, les conceptions scientifiques et le processus de changement en tant que tel.

En plus de tenter de le définir, de nombreux chercheurs ont voulu conceptualiser le processus de changement conceptuel et différents modèles ont ainsi été proposés.

2.1.3 Des modèles du changement conceptuel

2.1.3.1 Le modèle de Nussbaum et Novick

Le modèle de Nussbaum et Novick (1982) repose sur la conviction qu'un apprentissage scientifique doit nécessairement passer par une modification, ou plus

précisément une accommodation, des conceptions existantes. Un enseignant doit donc mettre en place différentes stratégies éducatives afin de provoquer cette accommodation, dont la stratégie la plus centrale à ce modèle : celle du conflit cognitif. Cette idée découle directement des théories de Kuhn et de Piaget selon lesquelles un changement conceptuel n'est possible qu'à partir du moment où une personne se trouve confrontée aux limites de ses conceptions. Par ailleurs, en psychologie, la théorie de la dissonance cognitive (Festinger, 1957) soutient qu'un élève réalisant que ses conceptions sont inappropriées deviendrait insatisfait de l'état de ses connaissances actuelles et, à cause de cet état d'inconfort, chercherait à les modifier. Piaget (1974) a pour sa part qualifié cet état psychologique de déséquilibre cognitif. Le modèle de Nussbaum et Novick comprend donc trois phases : 1) l'exposition des idées alternatives de l'élève par la présentation d'un « événement exposant » (*exposing event*), 2) la création du conflit cognitif découlant de la présentation d'un « événement divergent » (*discrepant event*) et 3) l'encouragement à l'accommodation cognitive. La première phase consiste à amener l'élève à parler ouvertement de ses conceptions afin qu'il en prenne conscience et qu'elles soient facilement identifiables pour l'enseignant. Pour ce faire, l'enseignant introduit un événement propice à l'émergence et à l'exposition de ces conceptions. La deuxième étape consiste à créer un conflit cognitif en introduisant un événement que les conceptions initiales de l'élève ne peuvent expliquer (*discrepant event*). Ce conflit cognitif aurait pour effet de provoquer une situation d'inconfort ou d'insatisfaction qui entraînera chez l'élève une motivation à vouloir régler le conflit en accommodant ses conceptions initiales. La troisième étape prévoit d'encourager les élèves à trouver une solution et à articuler leur nouvelle conception. Pour Nussbaum et Novick, les préconceptions des élèves seraient donc modifiées de façon considérable ou encore complètement remplacées lors du processus de changement conceptuel.

2.1.3.2 Le modèle de Posner, Strike, Hewson et Gertzog

Le modèle de Posner et al. (1982) est le plus cité et il est à la base de la majorité des recherches sur le changement conceptuel. Tout comme le modèle de Nussbaum et Novick (1982), Posner et son équipe s'appuient aussi sur les travaux de Piaget et de Kuhn. Selon ce modèle, les conceptions des élèves sont des unités entières (c'est-à-dire que chacune est une unité complète, non fragmentée) et ce sont ces conceptions mêmes qui changent durant le processus de changement conceptuel. Le changement conceptuel est donc également perçu comme une accommodation. Selon ce modèle, il importe que l'élève soit confronté aux limites de ses conceptions. Un élève doit être en mesure de détecter les événements que ses propres conceptions ne peuvent expliquer et un changement conceptuel est susceptible de se produire, de façon graduelle, à partir du moment où l'élève entre en contact avec une théorie possédant un plus grand pouvoir prédictif que la sienne. Quatre conditions sont nécessaires pour que ce changement ait lieu : 1) on doit ressentir une insatisfaction par rapport à la conception en place, 2) la nouvelle conception doit être intelligible, 3) elle doit être plausible, et 4) elle doit être fertile, c'est-à-dire qu'elle doit apporter de nouvelles explications à des problèmes. Pour ces auteurs, le changement conceptuel découlerait donc d'une compétition entre les conceptions et il consisterait en un remplacement des conceptions initiales de l'apprenant.

2.1.3.3 Le modèle de Giordan et de Vecchi

Le modèle allostérique de Giordan et de Vecchi (1987) accorde quant à lui une importance particulière au contexte d'apprentissage. Le nom du modèle : « allostérique », est une métaphore provenant de la biologie moléculaire et s'inspire des protéines allostériques dont la structure et la fonctionnalité changent sous l'influence de leur environnement. Selon ce modèle : « apprendre, c'est transformer

ses conceptions » (Giordan, 1998). Il faut donc accepter de partir des conceptions initiales de l'élève, qui constituent les seuls éléments dont il dispose pour effectuer cette transformation, pour chercher à les dépasser. Ces auteurs croient qu'il est essentiel de penser le changement conceptuel, c'est-à-dire la transformation du savoir, comme un processus simultané de déconstruction-reconstruction des conceptions dans lequel l'ancien savoir serait transformé et ne céderait véritablement la place au nouveau savoir qu'à partir du moment où il apparaîtrait dépassé. Dans un premier temps, il semble donc nécessaire d'introduire un conflit cognitif, une dissonance, pour faciliter la déconstruction et, dans un deuxième temps, d'accompagner l'élève pour aider à la reconstruction (c'est-à-dire à une évolution vers un nouvel état de savoir). Il s'agit donc d'une utilisation active du conflit cognitif, car il n'est pas seulement question que l'élève découvre lui-même les limites de ses propres conceptions (Posner et al., 1982), il est plutôt question d'introduire délibérément un conflit en confrontant ses conceptions existantes. Pour ces chercheurs, le changement conceptuel repose donc sur une transformation profonde des conceptions de l'élève.

2.1.3.4 Le modèle de Vosniadou

Pour Vosniadou (1994), le changement conceptuel se situe à un autre niveau que celui des concepts. Selon ce modèle, chaque individu entretiendrait un ou des cadres théoriques naïfs. Ces derniers seraient construits à partir des présuppositions ontologiques et épistémologiques que les enfants élaborent durant la petite enfance. Pour réaliser un changement conceptuel, un élève devrait donc réussir à modifier ces présuppositions épistémologiques pour parvenir à réviser ses cadres théoriques spécifiques. Cette modification aurait lieu à partir du moment où les connaissances que l'élève reçoit entrent en conflit et ne peuvent pas être assimilées à son cadre théorique existant. Pour Vosniadou, le changement conceptuel reposerait donc sur

une modification, non pas des conceptions, mais bien des cadres théoriques de l'élève dans lesquels sont imbriquées les présuppositions qui lui permettent d'appréhender le monde qui l'entoure.

2.1.3.5 Le modèle de diSessa

Pour diSessa (1993, 1998, 2006), l'élève posséderait à la base une connaissance morcelée en plusieurs unités (*knowledge in pieces*) qui, agencées d'une façon spécifique, forment les préconceptions. diSessa nomme ces unités les primitives phénoménologiques (*p-prims*). Il définit les *p-prims* comme étant des principes abstraits et intuitifs que possèdent les élèves et qui guident leur analyse de différents phénomènes. Ces *p-prims* seraient nombreuses, robustes et fortement associées à des contextes particuliers, ce qui pourrait en partie expliquer la résistance des préconceptions des élèves au changement. Lors de la réalisation d'un changement conceptuel, un élève développerait des classes de coordination qui lui permettraient d'organiser de façon systématique ses structures de connaissance pour atteindre un savoir scientifique. Ce qui changerait dans le changement conceptuel, c'est donc le choix des *p-prims* à mobiliser ou la façon dont sont agencés les paramètres que ces *p-prims* coordonnent. Pour réaliser un changement conceptuel, il serait nécessaire non pas d'effacer les idées naïves ou intuitives des élèves, mais bien de recontextualiser leurs *p-prims* de façon à ce qu'elles deviennent coordonnées conformément au savoir scientifique. Pour diSessa, le changement conceptuel nécessite donc un important travail d'intégration durant lequel l'agencement des idées intuitives des apprenants est modifié. Ce ne sont donc pas les conceptions mêmes qui changent, mais bien leur organisation par le biais du développement des classes de coordination qui deviennent progressivement en accord avec les connaissances scientifiques.

2.1.3.6 Le modèle de Stavy et Tirosh

Plus récemment, Stavy et Tirosh (2000) ont élaboré un modèle du changement conceptuel, celui des « règles intuitives » (*intuitive rules*), qui reconnaît l'importance des conceptions initiales des élèves et qui fournit une explication originale quant à l'origine de ces dernières. Pour les auteurs de ce modèle, ce sont les conceptions antérieures des élèves qui seraient à l'origine de la plupart de leurs erreurs. Ces conceptions antérieures en mathématiques et en sciences s'appuieraient sur des règles intuitives. Ces dernières sembleraient à première vue évidentes pour les élèves qui les considéreraient comme étant généralisables et exclusives : aucune autre explication n'étant alors acceptée. Par exemple, la règle intuitive *More A- More B* pourrait engendrer l'erreur suivante : plus l'aire d'une figure est grande (*More A*), plus son périmètre l'est aussi (*More B*), alors que ce n'est pas nécessairement le cas. De plus, lorsqu'on présente aux élèves des problèmes faisant appel à ces règles intuitives, ceux pour lesquels les réponses vont de pair avec la règle intuitive de l'élève semblent induire une réponse plus assurée et plus rapide. Ces règles intuitives entraîneraient alors un fort sentiment de confiance chez les élèves. La mobilisation de ces règles mène parfois à un raisonnement scientifiquement correct. Toutefois, lorsque l'application de ces règles intuitives mène à des réponses incorrectes, on parle alors d'« interférences intuitives ». Dans ces situations, les règles intuitives de l'individu interféreraient et nuiraient à son raisonnement scientifique.

Selon Stavy et Tirosh, c'est donc le fait de mobiliser ces règles intuitives dans certains contextes précis (créant ainsi des interférences intuitives) qui expliquerait les erreurs fréquentes des élèves. Pour l'enseignement de certains concepts, un changement conceptuel ne serait donc possible que si l'élève parvient à surmonter sa tendance naturelle à mobiliser une ou plusieurs règle(s) intuitive(s) ou encore à utiliser ces règles différemment.

2.1.3.7 Le modèle de Bélanger

Pour sa part, Bélanger (2008) souligne que le terme « changement » dans l'expression « changement conceptuel » ne doit pas nécessairement être vu au sens de « remplacement ». Selon lui, un changement conceptuel proviendrait non pas d'une éradication de la conception initiale de l'apprenant, mais bien du développement d'une cohabitation, c'est-à-dire d'une coexistence, entre la conception initiale et la conception scientifique, chacune pouvant être efficace dans un contexte précis. Deux systèmes explicatifs pourraient ainsi cohabiter et, selon Bélanger (2008), ces systèmes seraient à la fois « différents, concurrents et complémentaires » (p. 13). Le modèle que propose cet auteur, qu'il nomme le « modèle de la complexification conceptuelle » s'intéresse principalement aux structures cognitives servant d'intermédiaires entre les conceptions qui coexistent. Ce modèle présente cinq types de structures cognitives permettant de lier ces conceptions de différentes façons, en permettant, par exemple, la comparaison ou encore la hiérarchisation. Le terme « complexification » renvoie à l'idée d'une « coordination de plusieurs conceptions entre elles, à leur intégration au sein d'une structure cognitive élaborée, plus riche par cette intégration même que la somme des conceptions qu'elle comprend » (p. 155). Selon Bélanger, le changement conceptuel posséderait donc un aspect cumulatif, car une conception scientifique pourrait s'ajouter et coexister avec une conception initiale et parce que plusieurs liens pourraient être créés entre elles.

2.1.4 Discussion des modèles présentés

Cette brève synthèse des principaux modèles de changement conceptuel permet d'en faire ressortir les points communs. D'abord, il semble que tous s'entendent sur l'importance de prendre en compte les conceptions initiales des élèves dans l'étude et la réalisation d'un changement conceptuel. Il semble également que tous les

chercheurs s'accordent sur le fait que les conceptions initiales apparaissent robustes et que le changement conceptuel n'est pas facile à réaliser.

Par ailleurs, on remarque que plusieurs divergences théoriques opposent certains de ces modèles. En premier lieu, les chercheurs ne s'entendent pas sur l'unité d'analyse du changement conceptuel. Pour certains, le changement conceptuel se situe au niveau des conceptions alors que pour d'autres, il se situe au niveau des sous-unités conceptuelles qui forment ces conceptions ou encore au niveau de structures plus larges dans lesquelles les conceptions (ou les façons intuitives d'appréhender le monde) seraient imbriquées. La nature des connaissances antérieures des élèves ne fait donc pas consensus. En deuxième lieu, le choix d'unité d'analyse a un impact sur la façon dont les chercheurs conçoivent le changement qui s'opère durant le processus de changement conceptuel. Pour ceux qui étudient ce changement au niveau des conceptions (Nussbaum & Novick, 1982; Posner et al., 1982), un changement conceptuel aurait lieu à la suite d'un changement ou d'une modification de ces conceptions. Pour ceux qui choisissent plutôt d'en faire l'étude au niveau des sous-unités conceptuelles (c'est-à-dire des conceptions fragmentées), comme c'est notamment le cas de diSessa (1993, 1998, 2006), le changement résulterait davantage d'un réagencement de ces sous-unités de façon à ce que leur agencement devienne conforme au savoir scientifique.

Ces différentes façons de concevoir le processus du changement conceptuel influencent les pratiques pédagogiques qui en découlent, notamment au niveau du choix de l'utilisation du conflit cognitif comme méthode pour parvenir au changement conceptuel.

2.1.5 L'évolution des conceptions des élèves à la suite d'un changement conceptuel

Il semble donc que les chercheurs ne fassent pas consensus relativement à différents aspects du changement conceptuel. En plus des aspects énoncés ci-haut, il existe également un débat important concernant ce qui advient des préconceptions des élèves à la suite d'un changement conceptuel (Bélanger, 2008). Ces conceptions sont-elles supprimées, remplacées, réorganisées, intégrées dans une nouvelle théorie plus large ou demeurent-elles présentes et coexistent-elles avec les nouveaux savoirs scientifiques?

Les modèles de Nussbaum et Novick (1982) et de Posner et al. (1982) présentent tous deux le changement conceptuel comme étant une accommodation. Nussbaum et Novick affirment ainsi : « the process may seem to be replacing the preconception with the scientific framework » (1982, p. 185). Dans le même sens, Posner et ses collègues présentent le résultat d'un changement conceptuel comme étant : « a substantial reorganization or change in one's central concepts » (1982, p. 223). Il semble donc clair pour ces auteurs que les conceptions initiales subissent une modification profonde et il apparaît logique de croire que les conceptions que l'on avait au départ ne sont plus disponibles à la suite d'un tel changement.

De façon similaire, Giordan et de Vecchi (1987) voient l'apprentissage comme une transformation des conceptions permettant à l'apprenant de passer d'un état de savoir à un autre. Les conceptions initiales étant transformées, cela impliquerait donc qu'elles ne soient plus accessibles à la suite de l'apprentissage.

Pour Vosniadou, le changement conceptuel serait : « a process that requires the significant reorganization of existing knowledge structures and not just their

enrichment » (2001, p. 384). Cette définition pointe donc dans la même direction que les modèles précédents. D'ailleurs, dans un récent article, Shtulman et son équipe (2012) effectuent un survol de plusieurs modèles de changement conceptuel et, parlant entre autres du modèle de Vosniadou, ils affirment que : « Implicit in the idea of knowledge restructuring is the idea that early modes of thought, once restructured, should no longer be accessible » (p. 210). Selon ces auteurs, le modèle de Vosniadou (1994) impliquerait donc une restructuration à la suite de laquelle les conceptions de l'élève ne seraient plus accessibles.

Pour sa part, diSessa présente plutôt un modèle du changement conceptuel dans lequel les conceptions sont morcelées en différents éléments, ce qu'il appelle *knowledge in pieces*. Il affirme ainsi : « Knowledge in pieces explains [...] why change is difficult. Elements need to be re-contextualized, not erased, and many coordinated changes are necessary to create normative scientific concepts » (2008, p. 44). Il semblerait selon cette idée que les éléments constituant les conceptions ne soient pas effacés lors d'un changement conceptuel, mais plutôt réagencés ou recontextualisés. Si cette même organisation réapparaît (c'est-à-dire si les éléments qui constituent la conception retrouvent leur agencement initial), les anciennes conceptions devraient alors être de nouveau accessibles.

Shtulman et Valcarcel (2012, p.214) s'appuient d'ailleurs sur le modèle de diSessa pour étayer leur hypothèse d'une coexistence des conceptions naïves et scientifiques.

Ils expliquent cette coexistence par la possibilité suivante :

One possible modification would be to stipulate that naïve theories and scientific theories take different forms of representation. Naïve theories might take a more contextual or more phenomenological representation, whereas scientific theories might take a more abstract or more propositional representation (see diSessa, 1993).

Dans le même ordre d'idées, le modèle de Stavy et Tirosh (2000) suggère que les erreurs des élèves proviendraient souvent d'une utilisation inappropriée de règles intuitives. La mobilisation de ces règles intuitives serait déclenchée par les caractéristiques spécifiques d'un problème ou d'une situation : « students' responses to given mathematical and scientific tasks are often affected by common, external features of these tasks which trigger the use of these intuitive rules » (1999, p. 63). Ces règles intuitives demeureraient présentes et accessibles à l'élève, mais, pour réaliser un apprentissage, celui-ci devrait parvenir à déterminer les limites de l'application de ces règles.

Finalement, selon Bélanger (2008), le changement conceptuel ne serait pas synonyme de remplacement des conceptions. En effet, selon ce chercheur, il serait possible que :

le dépassement de la conception spontanée provienne non pas de son éradication à la faveur de l'explication scientifique, mais plutôt d'une sorte de cohabitation entre la conception spontanée initiale et la conception scientifique, chacune ayant alors son propre domaine de validité (p. 4).

Cette coexistence laisse supposer que la conception initiale demeurerait accessible et disponible à l'élève et qu'elle serait même appropriée dans certains contextes. L'idée générale d'une coexistence de conceptions est d'ailleurs présente au sein d'autres modèles de changement conceptuel (Mortimer, 1995 ; Solomon, 1983, 1984).

Ohlsson (2009) propose notamment un modèle (*The Resubsumption Theory*) dans lequel deux conceptions alternatives peuvent cohabiter. Selon ce modèle, la sélection d'une conception plutôt qu'une autre aurait lieu lors d'une étape qu'il qualifie d'« évaluation compétitive » et qui consisterait à choisir la conception qui possède la plus grande « utilité cognitive » dans le cadre d'une situation donnée.

Le tableau 2.1 présente une synthèse de la vision de chacun des modèles (détaillés à la section 2.1.4) à l'égard de l'évolution des conceptions des élèves à la suite d'un changement conceptuel.

Tableau 2.1 Synthèse des différentes perspectives des modèles de changement conceptuel présentés.

Modèles de changement conceptuel	Évolution des conceptions des élèves à la suite d'un changement conceptuel	Les préconceptions demeurent-elles disponibles?
Naussbaum et Novick (1982)	Le changement conceptuel découle d'une accommodation. Les conceptions des élèves sont donc modifiées ou remplacées.	Non
Posner et al. (1982)	Le changement conceptuel découle d'une accommodation. Les conceptions des élèves sont donc modifiées ou remplacées.	Non
Giordan et de Vecchi (1987)	Les conceptions des élèves sont déconstruites puis reconstruites : elles sont donc transformées.	Non
Vosniadou (1994)	Le changement conceptuel passe par une modification des présuppositions ontologiques et épistémologiques. Cela entraîne une révision des cadres théoriques naïfs.	Non, car le changement conceptuel implique une restructuration profonde des cadres théoriques.
diSessa (1993)	Le changement conceptuel passe par une réorganisation des <i>p-prims</i> qui forment les conceptions.	Oui, si les <i>p-prims</i> peuvent se réorganiser comme elles l'étaient avant le changement conceptuel.
Stavy et Tirosh (2000)	Un changement conceptuel n'est possible que si l'élève parvient à surmonter sa tendance naturelle à mobiliser une ou plusieurs règle(s) intuitive(s).	Oui, car les règles intuitives demeurent. C'est le choix et le moment de leur utilisation qui sont modifiés.
Bélangier (2008)	Les préconceptions des élèves coexistent avec les conceptions scientifiques.	Oui

Il ressort de ce tableau que les positions des chercheurs sur ce point varient considérablement. En effet, bien que ceux-ci ne prennent pas explicitement position par rapport à cet aspect précis touchant l'évolution des préconceptions des élèves, il semble que chacun des modèles proposés se rapproche davantage soit de l'idée d'une transformation des conceptions (auquel cas les conceptions initiales des élèves ne sont plus disponibles à la suite d'un changement conceptuel) ou de celle d'une coexistence (auquel cas les conceptions demeurent disponibles).

On pourrait supposer qu'une telle profusion de modèles présente l'avantage qu'ils puissent s'enrichir mutuellement et offrir un portrait de la situation plus large et différencié. D'ailleurs, selon certains auteurs (Astolfi et al., 2006; Chinn & Samarapungavan, 2009; Legendre, 2007), il serait même possible que plusieurs perspectives théoriques cohabitent dans la réalité de la salle de classe. Ce manque de cohésion en regard du changement conceptuel, et plus précisément en regard de ce qui advient des conceptions antérieures des élèves à la suite de la réalisation d'un changement conceptuel, témoigne de la complexité de ce processus de changement et de l'ampleur du travail qu'il reste à accomplir pour mieux comprendre cet aspect précis de l'apprentissage.

2.1.6 Études comportementales appuyant l'hypothèse de la coexistence

De récentes recherches comportementales supportent l'hypothèse d'une coexistence des conceptions et fournissent des résultats qui permettent d'apporter un éclairage additionnel au débat portant sur l'évolution des conceptions des élèves à la suite d'un changement conceptuel. Ces recherches sont discutées dans les paragraphes qui suivent.

La première recherche, réalisée par Lombrozo et son équipe (2007), portait sur les explications que donnaient des participants adultes atteints de la maladie d'Alzheimer à différents phénomènes qui leur étaient présentés. La maladie d'Alzheimer est reconnue pour causer d'importants déficits conceptuels et sémantiques ainsi que pour diminuer la capacité d'inhibition. Pour réaliser cette étude, les chercheurs se basaient sur des résultats obtenus lors de recherches précédentes montrant que, contrairement aux adultes, les jeunes enfants ont une tendance à expliquer les objets et les phénomènes qui les entourent en faisant continuellement référence à leurs fonctions (explications de nature téléologique). Par exemple, selon ces auteurs, des enfants de 7 ou 8 ans auraient tendance à croire que les montagnes existent pour offrir aux animaux un endroit où grimper. Or, cette tendance diminue généralement avec l'âge, car les enfants acquièrent de nouvelles connaissances et apprennent à fournir des explications moins naïves.

Dans le cadre l'étude de Lombrozo, deux groupes de participants ont été comparés : un groupe de 12 participants n'étant pas atteints d'Alzheimer et 17 participants atteints d'Alzheimer. Ces groupes étaient équivalents en regard de leur âge et de leur niveau d'éducation. Dix questions étaient présentées aux participants dans lesquelles deux explications leur étaient proposées : une explication plus mécaniste, c'est-à-dire plus scientifique, et une explication plus téléologique. Par exemple, à la question : « Pourquoi y-a-t-il de la pluie? », les deux réponses proposées étaient : « parce que la condensation de l'eau crée des nuages qui sont formés de gouttes d'eau » (explication scientifique) ou « pour que les plantes et les animaux aient de l'eau pour se nourrir et grandir » (explication téléologique).

Les résultats obtenus montrent que, contrairement aux participants adultes sains, les participants atteints d'Alzheimer choisissaient dans la majorité des cas les explications téléologiques, et ce, peu importe le domaine scientifique sur lequel

portait la question (organismes biologiques vivants, non vivants, phénomènes naturels, etc.).

Cette tendance à répondre selon une explication téléologique reflète le mode de pensée des jeunes enfants et les résultats obtenus par ces chercheurs pointent vers l'idée selon laquelle les conceptions que l'on possède en étant jeune ne disparaissent jamais vraiment de notre cerveau. Elles pourraient ressurgir lorsque certaines capacités, notamment celle de l'inhibition, font défaut, comme c'est le cas chez les patients atteints de la maladie d'Alzheimer.

En 2008, Zaitchik et Solomon se sont également intéressés aux processus cognitifs et aux explications données par des participants atteints d'Alzheimer lorsqu'on leur posait des questions sur différents objets ou phénomènes. Deux groupes de participants étaient comparés : 20 participants adultes sains et 24 participants atteints d'Alzheimer. Les chercheurs ont voulu savoir si les patients atteints d'Alzheimer avaient tendance à répondre de façon animiste, comme le font régulièrement les jeunes enfants. Une liste comprenant des noms d'animaux, de plantes, de phénomènes naturels et d'objets leur était présentée et les participants devaient dire si chacun des items de la liste était une chose vivante. Un entretien avec chacun des participants était ensuite réalisé de façon à ce qu'ils précisent ce que signifiait pour eux le mot « vivant » (ou « être vivant »).

Les résultats de cette étude montrent que la majorité des patients atteints d'Alzheimer (71%) donnaient des réponses animistes en affirmant, par exemple, qu'une lampe, une voiture ou encore le vent étaient vivants. Tout comme ceux de l'étude précédente, ces résultats semblent indiquer que les explications naïves ou intuitives de la nature, que l'on associe généralement aux préconceptions qu'entretiennent les jeunes enfants, ne disparaissent probablement jamais des structures cognitives de notre cerveau. Ces

préconceptions continueraient plutôt de coexister avec les conceptions scientifiques.

Une étude de Babai et al. (2010) appuie les résultats de cette recherche. Ces chercheurs ont en effet découvert que les conceptions naïves de ce qu'est une « chose vivante » persistaient à l'adolescence. Des étudiants de 15 et 16 ans, qui avaient suivi des cours de biologie, éprouvaient encore de la difficulté à classer comme étant vivants ou non-vivants des objets mobiles (qui bougent), par exemple une voiture ou un corps céleste, en comparaison à des objets statiques ou inanimés.

Se basant sur les résultats obtenus lors des deux recherches précédentes, Kelemen et son équipe (2009) ont analysé les explications que donnaient, cette fois-ci, des étudiants de niveau universitaire à différents phénomènes naturels. Ces chercheurs ont émis l'hypothèse d'une coexistence des explications téléologiques et des explications scientifiques. Selon cette hypothèse, les explications téléologiques ne seraient pas uniquement propres à l'enfance, mais elles demeureraient présentes comme système explicatif par défaut tout au long du développement, et même lors de l'acquisition de conceptions et d'explications de nature scientifique. Les explications téléologiques ne seraient donc pas remplacées, mais plutôt inhibées ou masquées par les explications scientifiques. Selon les chercheurs, des étudiants adultes auraient donc tendance à répondre selon un système explicatif téléologique si leur capacité à inhiber ces explications intuitives se trouve diminuée.

Pour vérifier leur hypothèse, les chercheurs ont sélectionné 121 participants adultes de niveau universitaire dont le parcours scolaire incluait plusieurs cours de science. Ils leur ont demandé de juger l'exactitude de certaines explications données à des phénomènes naturels. Deux types d'explications étaient présentées : des explications « test » qui nécessitaient de devoir surmonter une tendance à répondre de façon téléologique pour fournir une réponse correcte et des explications contrôle dont la

bonne réponse était en accord avec un mode de pensée téléologique. Afin de contrôler l'impact de l'inhibition, les chercheurs ont réparti les participants en trois groupes : un groupe devant répondre très rapidement (ce qui réduisait considérablement leur capacité d'inhibition), un groupe devant répondre assez rapidement et un autre groupe dont la vitesse de réponse n'était pas contrôlée.

Les résultats montrent que lorsqu'ils détenaient un très court laps de temps pour répondre, les participants adultes avaient tendance à endosser et à juger comme étant correctes des explications téléologiques de phénomènes naturels (ex : certaines roches ont une forme pointue afin que les animaux ne s'assoient pas dessus). Ils ne parvenaient donc pas à surmonter leur tendance spontanée à répondre selon un mode téléologique lorsqu'on leur présentait une explication « test ». Pourtant, les participants répondaient correctement lorsqu'on leur présentait une explication contrôlée, même si le temps dont ils disposaient pour répondre était considérablement réduit. Ces résultats sont donc en accord avec l'hypothèse de la coexistence, car même après avoir complété plusieurs cours de sciences, les participants détenaient toujours, de façon très explicite, des explications naïves qui ne sont pas scientifiquement correctes. Cette étude met ainsi en lumière deux points : 1) les conceptions naïves ne semblent pas disparaître ou être supprimées durant l'apprentissage, 2) la capacité à inhiber semble être un élément clé dans le processus de raisonnement scientifique.

Se situant dans la continuité de cette recherche, Kelemen et al. (2012) ont réalisé une étude afin de vérifier si les conceptions initiales demeuraient présentes même chez des scientifiques de haut niveau dont la connaissance des mécanismes physiques est quasi incontestable. Ils ont donc demandé à 80 scientifiques provenant de plusieurs universités américaines d'évaluer comme étant vraies ou fausses plusieurs explications de phénomènes naturels. Cette évaluation était réalisée selon deux

conditions : 1) une condition impliquant un temps de réponse limité, 2) une condition n'impliquant aucune limite de temps. Les participants étaient répartis aléatoirement entre les deux conditions. Les résultats obtenus montrent que ces participants avaient recours à des explications de nature téléologique lorsque leurs ressources cognitives étaient limitées (c'est-à-dire lorsqu'ils devaient répondre rapidement), et ce, en dépit de leur importante formation scientifique. L'hypothèse d'une coexistence des conceptions initiales et des conceptions scientifiques serait donc envisageable même chez des individus très instruits détenant un important bagage de connaissances scientifiques.

Les résultats des recherches précédentes (Lombrozo, Kelemen & Zaitchik, 2007; Zaitchik & Solomon, 2008; Kelemen & Rosset, 2009) suggèrent donc que les conceptions scientifiques agiraient comme des masques et dissimuleraient les conceptions initiales des élèves (et même des adultes instruits) plutôt que de les remplacer. Cependant, ces recherches n'ont mis en évidence la persistance de ces préconceptions que pour des distinctions conceptuelles bien précises telles que la différence entre les concepts de « vivant » et de « non-vivant ». Shtulman et Valcarcel (2012) ont alors voulu vérifier si ces mêmes résultats pouvaient être obtenus pour d'autres concepts scientifiques afin d'en mesurer la portée.

Ces chercheurs ont tenté de comprendre ce qui arrivait aux théories naïves des élèves lorsque ceux-ci apprenaient une théorie scientifique entrant en conflit avec leur théorie existante. Pour ce faire, ils ont recruté 150 étudiants de niveau universitaire possédant un bagage de connaissances scientifiques relativement important (c'est-à-dire qui avaient suivi en moyenne trois cours de sciences au collège). Ils leur ont demandé de vérifier l'exactitude de deux types d'énoncés en répondant rapidement. Les énoncés pouvaient aborder : 1) un phénomène envers lequel les élèves entretiennent généralement peu de préconceptions, c'est-à-dire un énoncé vrai à la

fois d'un point de vue naïf et scientifique (ex : la lune tourne autour de la Terre) ou 2) un phénomène envers lequel les élèves entretiennent généralement de fortes préconceptions, c'est-à-dire un énoncé qui est faux d'un point de vue naïf, mais vrai d'un point de vue scientifique (ex : la Terre tourne autour du Soleil). Les énoncés touchaient à 10 domaines scientifiques différents : l'astronomie, l'évolution, les fractions, la génétique, les germes, la matière, la mécanique, la physiologie, la thermodynamique et les ondes. Les participants devaient déterminer si les 200 énoncés qui leur étaient présentés étaient corrects ou incorrects et les chercheurs comparaient à la fois l'exactitude des réponses obtenues et le temps de réponse des participants. L'hypothèse principale des chercheurs était que si les conceptions initiales survivent au processus de changement conceptuel et cohabitent avec les conceptions scientifiques, alors des énoncés portant sur un phénomène auquel de fortes préconceptions sont associées (ex : la Terre tourne autour du Soleil) devraient provoquer un conflit cognitif plus fort, qui se manifesterait par un temps de réaction plus élevé et une moins grande exactitude des réponses.

En accord avec cette hypothèse, les résultats obtenus indiquent que les participants répondaient plus lentement et de façon moins exacte pour les énoncés portant sur un phénomène auquel de fortes préconceptions sont associées, et ce, pour les 10 domaines scientifiques explorés. Cela signalerait la présence d'un plus grand conflit cognitif pour ces énoncés. Ce conflit s'expliquerait par le fait que, si les conceptions initiales coexistent réellement avec les conceptions scientifiques, alors l'évaluation de phénomènes scientifiques auxquels sont associées de fortes conceptions initiales demanderait un plus grand effort de réflexion afin de surmonter la compétition existant entre les deux conceptions. Ces résultats seraient donc en accord avec les résultats des recherches antérieures. Toutefois, la recherche de Shtulman et Valcarcel ne fait pas que reproduire les résultats obtenus précédemment, elle permet également d'en étendre la portée à plusieurs domaines scientifiques. Elle

appuie l'idée selon laquelle les conceptions initiales des apprenants ne seraient pas supprimées ou transformées lors d'un changement conceptuel. Elle permet de soutenir la thèse d'une coexistence de ces conceptions et laisse entrevoir que ce phénomène de coexistence serait commun à un grand nombre de disciplines scientifiques.

Ces cinq recherches appuient toutes l'idée selon laquelle les conceptions fréquentes des élèves ne disparaîtraient possiblement jamais de leur cerveau. Elles demeureraient encodées dans leurs circuits neuronaux et coexisteraient avec les conceptions scientifiques, malgré leur incompatibilité. Selon ces chercheurs, les élèves auraient donc encore accès à leurs anciennes théories naïves, même lorsqu'ils ont réalisé un changement conceptuel.

Ces recherches sous-entendent également que la coexistence des conceptions impliquerait un raisonnement plus complexe (afin de sélectionner une conception plutôt qu'une autre ou encore pour parvenir à bloquer une conception et à en mobiliser une autre) et cette complexité se traduirait par un temps de réaction plus élevé. Le fait de disposer d'un temps de réponse limité et, conséquemment, de fournir une réponse naïve, ou le fait de répondre plus lentement face à un stimulus auquel sont associées de fortes préconceptions seraient donc, selon ces chercheurs, des signes d'une coexistence des conceptions. Souvent utilisé dans les études en psychologie, le temps de réaction est en effet reconnu comme étant un bon indicateur de la complexité du raisonnement nécessaire à la réalisation d'une tâche cognitive (Stavy & Babai, 2010). Cependant, même si l'on observe qu'une personne prend plus de temps à répondre lors d'une situation où il y a interférence, cela ne permet pas d'identifier précisément quel mécanisme est à l'origine de l'augmentation de son temps de réponse. La méthode du temps de réaction permet donc d'identifier la présence ou la nécessité d'un raisonnement plus complexe, mais elle ne permet pas de

comprendre ou d'identifier quel mécanisme est impliqué dans ce raisonnement. La méthode consistant à réduire le temps dont dispose une personne pour répondre présente la même limite. En effet, même si cette méthode permet de voir qu'une personne disposant d'un temps de réponse plus court a tendance à répondre de façon naïve, elle ne permet pas d'identifier le mécanisme qui permet en temps normal à cette personne (lorsque son temps de réponse n'est pas limité) de répondre de façon scientifique.

Or, une hypothèse pertinente serait que la capacité à raisonner et à répondre de façon scientifique dépendrait de la faculté à inhiber ses préconceptions. En effet, si l'on considère que les conceptions fréquentes des élèves coexistent avec leurs conceptions scientifiques et qu'ils sont capables de raisonner scientifiquement, c'est probablement qu'ils parviennent à inhiber leurs préconceptions pour mobiliser leurs conceptions scientifiques. Cependant, bien que les résultats des recherches précédentes indiquent la présence d'un raisonnement plus complexe, ils ne permettent pas d'établir un lien direct avec l'inhibition. Un moyen pour s'assurer de cette présence d'inhibition est de vérifier, à l'aide de l'imagerie cérébrale, si les régions du cerveau associées à l'inhibition sont réellement mobilisées, chez les experts en sciences, lors de la réalisation d'une tâche de nature scientifique.

L'inhibition étant pressentie comme un élément clé du processus de changement conceptuel, il apparaît nécessaire de définir clairement ce mécanisme et d'en étudier les caractéristiques pour mieux comprendre son rôle dans l'apprentissage des sciences.

2.2 Le mécanisme cérébral de l'inhibition

2.2.1 Ce qu'est l'inhibition

Masson (2012) définit l'inhibition comme étant un mécanisme cérébral permettant le contrôle ou la désactivation d'une région cérébrale par une autre région cérébrale. Cette définition est très similaire à celle de Ward (2010) dans laquelle il est également question d'une diminution de l'activité d'une région cérébrale spécifique due au contrôle exercé par une autre région cérébrale. Selon Ward, l'inhibition serait : « a reduction/suppression of the activity of a brain region (or cognitive process), triggered by activity in another region/process » (p. 70). Au niveau des processus neuronaux, l'inhibition aurait lieu lorsqu'un (ou plusieurs) neurone présynaptique est actif et qu'il envoie un signal au neurone postsynaptique afin que celui-ci devienne ou demeure inactif.

On associe généralement l'inhibition aux fonctions exécutives (Garavan, Ross, Murphy, Roche, & Stein, 2002 ; Ward, 2010). Ces fonctions cognitives de haut niveau relèvent de processus complexes qui interviennent pour superviser ou contrôler l'activité des différentes régions cérébrales (Ward, 2010). Il est possible d'illustrer le rôle des fonctions exécutives en le comparant à celui d'un chef d'orchestre. Les fonctions exécutives agiraient comme « chef d'orchestre du cerveau » (Goldberg, 2001, cité par Ward, 2010, p. 283), car elles détiennent un rôle métacognitif et peuvent déclencher l'activité d'une région cérébrale précise ou la stopper (selon ce que le contexte exige), et même synchroniser l'activité simultanée de plusieurs régions cérébrales. Elles exercent ainsi un contrôle cognitif ayant un impact au niveau exécutif. Houdé (2004) définit une fonction exécutive comme étant : « une fonction du cerveau qui permet de contrôler l'exécution des conduites et, lorsque la situation l'impose, de prendre des décisions stratégiques » (p. 80). Ce contrôle est nécessaire pour parvenir à réaliser de nombreuses actions au quotidien.

Par exemple, conduire une voiture se fait souvent de façon très automatique. Il ne semble pas nécessaire de mettre en place des réflexions conscientes pour freiner ou accélérer. Cependant, lorsque les habitudes de conduites sont modifiées (route fermée, obstacle inattendu, trajet inconnu, etc.), les fonctions exécutives entrent en jeu et permettent notamment de réduire ou d'augmenter l'activité de certaines régions cérébrales de façon à exercer un contrôle sur la situation.

Parmi les nombreuses fonctions exécutives (planification, attention, anticipation, mémoire de travail, etc.), celle de l'inhibition représente un mécanisme d'adaptation (Houdé et al., 2000) qui permet de supprimer ou de mettre fin à des comportements inappropriés, dangereux ou qui ne sont plus nécessaires (Chambers, Garavan, & Belgrove, 2009, p. 632). De nombreuses études (Barkley, 1999; Bush et al., 1998) indiquent d'ailleurs qu'un déficit au niveau de la capacité d'inhibition serait à l'origine du trouble déficitaire de l'attention avec hyperactivité (TDAH). Le concept d'inhibition semble aussi particulièrement intéressant pour le domaine de l'apprentissage, notamment en ce qui a trait aux conceptions fréquentes des élèves, car il est démontré que le mécanisme de l'inhibition entre en jeu lorsqu'il est nécessaire de surmonter des réponses qui sont habituelles ou surappries (*overlearned*) afin de pouvoir sélectionner une réponse alternative (van den Wildenberg & van der Molen, 2004; Ward, 2010).

S'inspirant des travaux de Siegler (2000, 2001), Houdé (2009) propose de concevoir le processus de développement et d'apprentissage comme étant le résultat d'une compétition/sélection entre différentes stratégies cognitives. Selon ce chercheur, les stratégies cognitives seraient comme « des vagues qui se chevauchent » (p. 14) à tout moment et qui entrent en compétition les unes avec les autres. Le processus de développement nécessiterait donc, d'une part, de construire et d'activer différentes stratégies cognitives, et d'autre part, d'apprendre à inhiber différentes stratégies qui

entrent en compétition dans le cerveau. Il faudrait ainsi inhiber certains circuits cérébraux habituels, rapides et automatisés (liés à l'utilisation d'heuristiques) au profit de circuits moins utilisés et donc plus lents (permettant la mobilisation de stratégies scientifiques et d'algorithmes). Selon cette vision de l'apprentissage, l'erreur d'un élève ne serait pas forcément due à un manque de logique ou de compétence en regard d'une notion précise. Cette erreur pourrait plutôt provenir d'un défaut d'inhibition.

2.2.2 Les régions cérébrales associées à l'inhibition

Plusieurs tâches neuropsychologiques ont été développées dans le but d'évaluer les fonctions cognitives d'un individu. Certaines de ces tâches permettent d'étudier spécifiquement l'inhibition. Celles-ci comprennent, pour la plupart, un effet d'interférence (ou un conflit) qui oblige le participant à surmonter (ou inhiber) une interférence précise, variant selon la tâche, pour répondre correctement. Combinées à l'utilisation de technologies d'imagerie cérébrale, ces différentes tâches permettent aujourd'hui d'identifier les régions cérébrales précises liées à l'inhibition. Il ressort des résultats de plusieurs recherches que trois régions cérébrales seraient en lien avec la capacité à inhiber : le cortex cingulaire antérieur (CCA), le cortex préfrontal ventrolatéral et le cortex préfrontal dorsolatéral. Trois tâches neuropsychologiques (Stroop, Wisconsin et Go/No-Go) sont donc ici détaillées et les résultats de recherches en neuroimagerie ayant utilisé ces tâches sont également présentés de façon à faire ressortir les régions cérébrales associées à l'inhibition.

2.2.2.1 La tâche de Stroop

La tâche classique de Stroop (1935) présente aux sujets plusieurs mots écrits de différentes couleurs. Les sujets doivent identifier la couleur du mot sans lire le mot

lui-même. Certaines situations présentées sont congruentes, c'est-à-dire que la couleur du mot correspond à ce qui est écrit (par exemple, le mot « bleu » écrit en bleu) et d'autres situations sont incongruentes, c'est-à-dire que la couleur du mot ne correspond pas à ce qui est écrit (par exemple, le mot « rouge » écrit en vert). Pour répondre correctement, le sujet doit parvenir à sélectionner l'information pertinente (la couleur du mot) et à réprimer, ou inhiber, l'information non pertinente (le sens du mot). Le temps de réaction nécessaire à l'identification de la couleur du mot est significativement plus élevé lorsque le sujet doit évaluer et répondre à une situation qui exige d'inhiber.

De nombreuses recherches ont utilisé cette tâche dans le cadre d'études impliquant la neuroimagerie. Une recherche de Pardo, Pardo, Janer et Raichle (1990) utilisant la tomographie par émission de positrons (TEP), une technologie permettant d'obtenir une image fonctionnelle du cerveau par le biais d'un traceur radioactif injecté dans le sang, a mis en évidence une activation plus forte du CCA lors de l'évaluation de situations incongruentes. Ce résultat a d'ailleurs été confirmé par une recherche ultérieure (Carter, Mintum, & Cohen, 1995).

Utilisant l'IRMf, Bush et ses collaborateurs (1998) ont réalisé une adaptation de la tâche de Stroop, intitulée *counting stroop task* dans laquelle les participants devaient dire combien de mots identiques leur étaient présentés. Ces mots pouvaient être des noms d'animaux ou des chiffres. Certaines situations ne comprenaient aucune interférence : on présentait, par exemple, quatre fois le mot « oiseau », et le participant répondait alors 4. D'autres situations comprenaient une interférence : on présentait, par exemple, quatre fois le mot « deux » et le participant devait tout de même répondre 4, bien que le sens du mot présenté interfère avec le nombre de présentations de ce mot. Les participants devaient parvenir à inhiber leur tendance à répondre en fonction du sens du mot. Les résultats obtenus par ces chercheurs

montrent que cette capacité à inhiber dépendrait non seulement de la mobilisation du CCA, mais également du cortex préfrontal dorsolatéral. Une étude de Leung, Skudlarski, Gatenby, Peterson et Gore (2000) corrobore d'ailleurs ces résultats, car ces chercheurs ont identifié, à l'aide de l'IRMf, les régions du CCA et du cortex préfrontal dorsolatéral et ventrolatéral comme étant plus activées lors de la présentation d'une situation comprenant une interférence intuitive. Une autre recherche utilisant également l'IRMf (MacDonald, Cohen, Stenger, & Carter 2000) a engendré des résultats similaires : Le CCA et le cortex préfrontal dorsolatéral étaient les régions cérébrales les plus mobilisées lorsque le participant devait faire preuve d'inhibition.

2.2.2.2 Le test de Wisconsin

Dans ce test, quatre cartes différentes sont présentées aux participants. Ces cartes diffèrent sur trois aspects : leur motif (constitué de différentes formes : carrés, étoiles, triangles ou croix), la couleur de ce motif (rouge, vert, bleu ou jaune) et le nombre d'items composant le motif (1, 2, 3 ou 4). Les participants détiennent une carte qu'ils doivent associer, selon le critère de leur choix, à l'une des 4 cartes qui leur sont présentées. Aucun critère n'est donné aux participants pour associer les cartes : ils choisissent donc eux-mêmes un critère sur lequel ils s'appuient pour faire cette association (type de motif, couleur du motif ou nombre d'items). Puis, une fois l'association faite, une rétroaction est donnée aux participants afin de leur dire s'ils ont choisi le bon critère pour associer les deux cartes. Si ce n'est pas le cas, ils doivent alors faire une autre tentative jusqu'à ce qu'ils forment la bonne association. Cette association (selon un critère précis) est généralement maintenue pour un ou plusieurs essais, mais elle est tout à coup modifiée et les participants doivent alors déterminer le nouveau critère permettant de faire l'association, en surmontant leur tendance à vouloir répondre selon le critère choisi précédemment. Cette tâche

implique dont d'inhiber une réponse devenue habituelle.

Dès 1963, Brenda Milner a fait l'étude de patients qui avaient des lésions au cortex préfrontal dorsolatéral. Elle a noté que ces patients performaient moins bien au test de Wisconsin, car ces derniers avaient tendance à continuer à associer les cartes selon un certain critère, malgré une rétroaction leur indiquant que ce critère n'était pas le bon. Ces résultats ont amené l'idée que le cortex préfrontal dorsolatéral était impliqué dans la capacité à inhiber et permettait de passer d'un mode de raisonnement à un autre.

Plusieurs études ont permis d'identifier les régions cérébrales mobilisées lors de la réalisation du test du Wisconsin. Ces études (Lie, Specht, Marshall, & Fink, 2006; Monchi, Petrides, Petre, Worsley, & Dagher, 2001) ont mis en évidence que le CCA ainsi que le cortex préfrontal dorsolatéral et ventrolatéral devenaient plus activés lorsque les participants devaient modifier leur critère d'association et donc inhiber les réponses préalablement apprises. Une méta-analyse (Buchsbaum, Greer, Chang, & Berman) réalisée en 2005 permet d'appuyer ces résultats.

2.2.2.3 La tâche Go/no-go

Durant la tâche de Go/no-go, plusieurs lettres de l'alphabet apparaissent, l'une après l'autre, sur un écran. On demande aux participants d'appuyer sur un bouton pour toutes les lettres de l'alphabet (condition go), à l'exception de la lettre X (condition no-go). Lorsque la lettre X apparaît, les participants doivent donc inhiber leur tendance à vouloir continuer à appuyer sur le bouton. Une recherche de Menon, Adleman, Whiter, Glover et Reiss (2001) a utilisé cette tâche d'inhibition combinée à l'électroencéphalographie (EEG). Les résultats montrent que les régions cérébrales les plus activées dans la condition no-go (nécessitant de l'inhibition) par rapport à la condition go étaient le CCA, le cortex préfrontal dorsolatéral ainsi que le cortex

préfrontal ventrolatéral. Des résultats identiques ont été obtenus par Liddle et ses collègues (2001) en utilisant l'IRMf.

Plus récemment, Chen et ses collaborateurs (Chen, Muggleton, Tzeng, Hung, & Juan, 2009) ont utilisé une tâche d'inhibition similaire (*stop signal task*) dans le cadre d'une étude impliquant l'utilisation de la stimulation magnétique transcranienne. Dans cette tâche d'inhibition, les participants devaient appuyer sur un bouton avec l'index de la main gauche lorsqu'un cercle apparaissait à gauche de l'écran et ils devaient appuyer sur un autre bouton avec l'index de la main droite lorsque le même cercle apparaissait à droite de l'écran. Par moments, le cercle apparaissait au centre de l'écran et les participants devaient alors cesser d'appuyer sur le bouton. Les résultats de cette étude montrent qu'une région précise du cortex préfrontal, le cortex moteur supplémentaire, était liée à la capacité des sujets à inhiber lors de l'apparition du cercle au centre de l'écran.

2.2.2.4 Synthèse des recherches présentées

La présentation de ces études en neuroimagerie permet donc d'identifier les régions du CCA et du cortex préfrontal comme étant les principales régions impliquées dans le processus d'inhibition (Garavan et al., 2002). Une étude de Macdonald et de son équipe (2000) a permis de dissocier l'activité respective du CCA et du cortex préfrontal dans le processus d'inhibition. Selon cette étude utilisant une version adaptée de la tâche de Stroop, le CCA serait responsable de la détection d'un conflit et le cortex préfrontal serait chargé d'augmenter le contrôle cognitif (et donc de mettre en place le mécanisme d'inhibition) suite à la détection de ce conflit.

Dans le même sens, Botvinick et son équipe (Botvinick, Braver, Barch, Carter, & Cohen, 2001; Botvinick, Cohen, & Carter, 2004; Botvinick, 2007) ont proposé un

modèle intégrateur de l'inhibition dans leur théorie du *conflict-monitoring*. Selon cette théorie, le CCA jouerait un rôle au niveau de la détection d'un conflit entre deux représentations existantes et il enverrait un signal afin d'engager le cortex préfrontal dans la résolution de ce conflit. Ces deux régions cérébrales seraient donc spécialisées pour accomplir des tâches précises et il existerait un pont entre la détection de conflit (CCA) et le contrôle cognitif (cortex préfrontal dorsolatéral et ventrolatéral).

La figure suivante permet d'identifier ces régions cérébrales impliquées dans le processus d'inhibition.

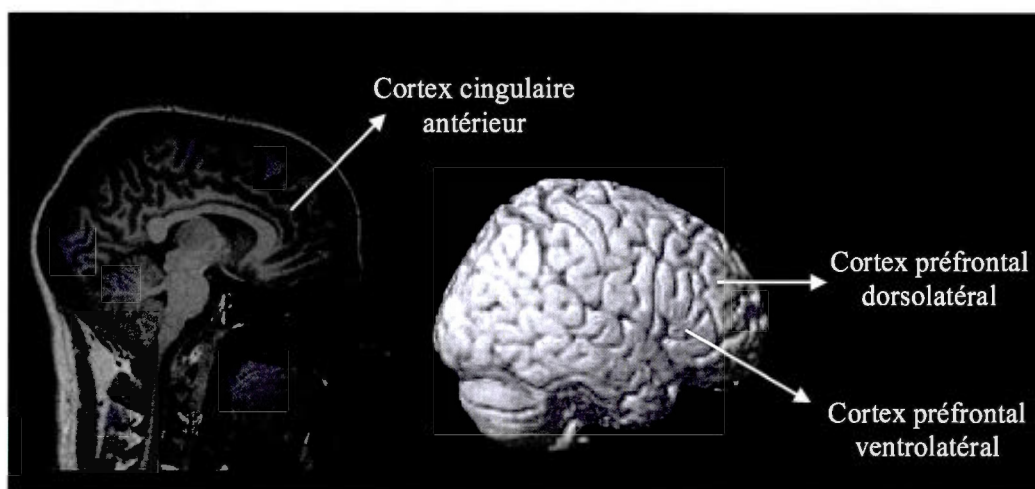


Figure 2.1 Identification des régions cérébrales liées à l'inhibition.

En ce qui a trait à l'apprentissage, un parallèle pourrait être établi entre la capacité à surmonter une tendance spontanée ou une réponse habituelle, mesurée dans les recherches présentées ci-haut, et la capacité à inhiber une conception fréquente pour répondre de façon scientifique. Plusieurs recherches se sont donc penchées sur le rôle spécifique de l'inhibition dans l'apprentissage et ont montré que la capacité à surmonter certaines conceptions fréquentes ou stratégies spontanées serait nécessaire

dans de nombreux domaines.

2.2.3 Le rôle de l'inhibition dans l'apprentissage

2.2.3.1 Inhibition et apprentissage de concepts liés à la pression de l'air

Kwon et Lawson (2000) se sont intéressés au développement de la capacité à raisonner de façon scientifique en lien avec la maturation des régions préfrontales du cerveau. Pour ce faire, 210 étudiants coréens âgés de 13 à 16 ans ont répondu à des questionnaires neuropsychologiques cherchant à mesurer quatre habiletés cognitives, dont l'inhibition. Les étudiants devaient également répondre à un questionnaire mesurant leur capacité à raisonner de façon scientifique ainsi qu'à un test portant sur des concepts scientifiques liés à la pression de l'air. Par la suite, une intervention pédagogique comprenant 14 leçons sur la pression de l'air était réalisée pour tous les étudiants. Puis, ceux-ci devaient répondre de nouveau au test portant sur ces concepts scientifiques. Les résultats obtenus par ces chercheurs démontrent que l'inhibition jouerait un rôle dans l'apprentissage des sciences. En effet, parmi les différents facteurs qui étaient mesurés (dont la capacité de la mémoire de travail, l'âge et la capacité de planification), l'inhibition constituait le meilleur prédicteur 1) de la capacité à raisonner de façon scientifique ainsi que 2) d'une amélioration de la compréhension de concepts scientifiques liés à la pression de l'air. Il semblerait donc que l'apprentissage de concepts scientifiques liés à la pression de l'air exigerait la capacité à inhiber des informations qui ne sont pas pertinentes, c'est-à-dire les préconceptions entretenues en regard de ce phénomène scientifique. Ces résultats comportementaux amènent l'idée que l'inhibition jouerait un rôle dans l'apprentissage de concepts scientifiques.

D'autres recherches se sont penchées sur le rôle de l'inhibition dans l'apprentissage

en l'étudiant à l'aide de l'imagerie cérébrale. Ces recherches ont analysé l'activité cérébrale de participants alors que ces derniers répondaient à différentes tâches de nature scolaire dans le but de vérifier si les régions cérébrales associées à l'inhibition étaient activées. Quatre recherches seront ici présentées. Ces recherches se sont précisément penchées sur le rôle de l'inhibition dans le cadre de tâches de raisonnement logique et de raisonnement mathématique.

2.2.3.2 Inhibition et raisonnement logique

Houdé et ses collègues (2000) ont voulu identifier les régions cérébrales associées à la capacité à surmonter des erreurs de raisonnement logique. Un exemple de ce genre d'erreur de raisonnement est illustré dans la situation qui suit. Des élèves sont positionnés devant un écran d'ordinateur sur lequel plusieurs formes géométriques de différentes couleurs sont affichées. On leur donne la consigne suivante « s'il n'y a pas de carré rouge à gauche, alors il y a un cercle jaune à droite » et on leur demande de placer correctement deux figures côte à côte, de façon à respecter cette consigne. Plusieurs élèves placeront alors un carré rouge à gauche et un cercle jaune à droite (ce qui est incorrect), car l'attention de ces derniers se porte naturellement sur les items mentionnés dans la consigne (les formes géométriques colorées) plutôt que sur la logique unissant ces items. Pour raisonner de façon logique à la suite de la lecture de cet énoncé, il faut être capable d'aller « contre la perception des éléments cités dans la règle » (Houdé, 2004, p. 92), de les inhiber. Une réponse correcte aurait plutôt été de placer, par exemple, un carré bleu à gauche et un losange vert à droite (d'autres réponses logiques pouvant aussi être correctes, tant qu'il n'y a pas de carré rouge à gauche et de cercle jaune à droite).

Dans le cadre de cette recherche, la technologie de la TEP a été utilisée. L'activité cérébrale de huit étudiants masculins âgés de 19 à 26 ans a été comparée lors de la

réalisation de l'exercice de raisonnement détaillé ci-haut, avant et après qu'ils aient suivi un entraînement à l'inhibition. L'entraînement à l'inhibition consistait à avertir les sujets de la présence d'un piège de raisonnement et à leur montrer comment l'éviter. Lors d'un exercice de raisonnement logique similaire à celui détaillé précédemment, les chercheurs avertissaient les participants en leur disant que la source d'erreur dans le problème provenait de la tendance naturelle à porter son attention aux items mentionnés dans la consigne. Les participants étaient donc avisés que pour répondre correctement, ils devaient parvenir à surmonter cette tendance et porter attention à la logique même du problème. Cet entraînement visait spécifiquement à développer la capacité d'inhibition des participants.

Les chercheurs ont constaté qu'avant l'entraînement, les régions cérébrales les plus activées étaient des régions occipitales généralement liées à l'utilisation d'une stratégie perceptuelle. À l'inverse, après l'entraînement, les régions les plus activées étaient des régions frontales (incluant des régions du cortex préfrontal gauche ainsi que le CCA). Les participants qui avaient appris à surmonter leurs biais perceptuels (c'est-à-dire leur tendance à commettre des erreurs de raisonnement logique) activaient davantage des régions cérébrales liées à l'inhibition.

Cette équipe a conduit une autre recherche portant sur les erreurs de raisonnement logique (Houdé et al., 2001) en utilisant la TEP. Les chercheurs ont comparé l'activité cérébrale de deux groupes n'ayant pas reçu le même type d'enseignement. Le premier groupe avait reçu un enseignement de type logique alors que le deuxième groupe avait reçu un enseignement qualifié de « logicoémotionnel » dans lequel des avertissements émotifs étaient donnés aux participants afin que ceux-ci soient mis au courant des pièges que contenait une question et qu'ils évitent de commettre certaines erreurs de raisonnement. Les résultats obtenus montrent que les participants ayant reçu un enseignement « logicoémotionnel » parvenaient davantage à surmonter les

erreurs de raisonnement logique. Chez ces participants, le cortex cingulaire antérieur, lié à la détection de conflits, ainsi que le cortex préfrontal ventromédial, lié au contrôle des émotions et à la prise de décision, étaient plus activés. Il semblerait donc que la capacité à surmonter un mode de raisonnement intuitif (la capacité d'inhibition) semble en partie liée à l'émotion. La mise en place d'un entraînement logicoémotionnel à l'inhibition permettrait de développer la capacité d'inhibition, tel que cela a été démontré dans la recherche de Houdé et al. (2000), mais les résultats de cette recherche de 2001 montrent également que ce type d'entraînement serait aussi plus efficace qu'un entraînement uniquement axé sur la logique (c'est-à-dire, ne comprenant pas d'avertissements émotifs).

Ces deux recherches mettent donc en évidence le rôle majeur de l'inhibition dans l'apprentissage des processus de raisonnement logique. Elles laissent aussi entendre que certaines méthodes d'enseignement pourraient être plus efficaces que d'autres pour aider à développer la capacité d'inhibition des élèves et ainsi diminuer le risque que ceux-ci commettent des erreurs typiques de raisonnement logique. L'apprentissage de certains concepts nécessiterait l'évitement et l'inhibition d'un « piège ». De ce point de vue, l'enseignement de ces concepts devrait passer par une mise en garde des « pièges » qui y sont associés.

2.2.3.3 Inhibition et raisonnement mathématique

Stavy et Babai (2010) ont étudié le rôle de l'inhibition dans une tâche en mathématique. Les situations mathématiques présentées mettaient en jeu la conception fréquente selon laquelle plus une forme géométrique possède une grande aire, plus son périmètre est grand (il s'agissait donc d'une situation impliquant une règle intuitive de type *More A - More B*, tel que présenté au point 2.1.3.6 de ce cadre théorique).

Afin de vérifier leurs hypothèses, les chercheurs ont mesuré les temps de réaction de 14 adultes dont l'âge moyen était de 27 ans ainsi que l'exactitude de leurs réponses lors de la réalisation d'une tâche mathématique dans laquelle une variable non pertinente (l'aire) interférait avec le processus de raisonnement lié à la comparaison de périmètres. Les participants devaient comparer le périmètre de deux figures et dire si le périmètre de la première figure était (a) plus petit, (b) plus grand ou (c) égal à celui de la seconde figure. Les problèmes présentés pouvaient être de types intuitif ou contre-intuitif. La réponse aux problèmes de type intuitif était en accord avec la règle intuitive « plus l'aire est grande, plus le périmètre est grand », alors que la réponse aux problèmes de type contre-intuitif n'était pas en accord avec cette règle. Pour les problèmes contre-intuitifs, les participants devaient donc réussir à surmonter l'interférence intuitive en dépassant leur tendance spontanée à vouloir répondre selon la règle *More A - More B*.

Des images de l'activité cérébrale des participants ont été prises, à l'aide de l'IRMf, alors que ces derniers réalisaient la tâche en mathématiques. Les résultats obtenus montrent que pour les problèmes de type intuitif, des régions bilatérales du cortex pariétal, impliqué dans les processus spatial et perceptuel (dont la comparaison de quantités), étaient davantage activées. À l'opposé, les problèmes de type contre-intuitif engendraient des activations plus prononcées dans certaines aires bilatérales du cortex préfrontal, associé au contrôle cognitif et à l'inhibition. Cela indiquerait que les participants devaient effectivement inhiber leur utilisation de la règle intuitive *More A - More B*, afin d'évaluer correctement le périmètre des deux figures présentées et de fournir la réponse correcte. Le mécanisme de l'inhibition jouerait donc également un rôle dans le raisonnement mathématique.

Dans une recherche plus récente, Houdé et son équipe (2011) se sont également penchés sur le rôle de l'inhibition en mathématiques en étudiant les régions cérébrales

activées lors de la réalisation de la tâche classique piagétienne de conservation du nombre. Cette tâche consiste en la présentation de deux rangées comprenant le même nombre de jetons disposés selon deux conditions différentes. Au départ, les jetons sont placés les uns vis-à-vis les autres (condition 1). Il est alors demandé aux enfants d'évaluer si les deux rangées présentent le même nombre de jetons (cette évaluation est généralement correcte). Par la suite, l'espacement entre les jetons de l'une des rangées est modifié, mais pas le nombre de jetons, de façon à ce que cette rangée soit plus longue que l'autre (condition 2). Les enfants doivent de nouveau évaluer si les deux rangées contiennent le même nombre de jetons. Selon Piaget, des enfants de 5 ou 6 ans ne seraient pas en mesure de réussir cette tâche alors qu'à partir de 7 ans, ils le seraient, étant donné qu'ils auraient développé le principe de conservation du nombre et qu'ils seraient alors capables de surmonter le raisonnement intuitif selon lequel la longueur correspond au nombre. Houdé et ses collègues ont donc voulu identifier ce qui se passait, au niveau cérébral, lors de l'acquisition de ce principe.

À l'aide de l'IRMf, l'activité cérébrale de 38 enfants de 5 et 6 ans (considérés comme n'ayant pas encore acquis le principe de conservation du nombre) a été comparée à l'activité cérébrale de 22 enfants de 9 et 10 ans (considérés comme ayant acquis ce principe). Des images de l'activité cérébrale de ces enfants étaient prises alors que ces derniers répondaient à la tâche de conservation du nombre développée par Piaget.

Les résultats indiquent que tous les enfants parvenaient à fournir une réponse correcte lorsque les deux rangées de jetons avaient la même longueur (condition 1). De plus, le sillon intrapariétal, une région responsable de la comparaison spatiale de deux quantités, était activé chez les deux groupes de participants pour les deux conditions. Cependant, la grande majorité des enfants de 5 et 6 ans ne parvenaient pas à donner la bonne réponse lorsque les deux rangées de jetons n'avaient pas la même longueur (condition 2), alors que les enfants de 9 et 10 ans en étaient généralement capables. Il

semblerait donc que l'activation d'une région cérébrale supplémentaire soit nécessaire pour parvenir à dépasser le biais perceptuel de la longueur et cette région cérébrale serait activée chez les enfants de 9-10 ans qui répondent correctement, mais ne le serait pas chez les enfants de 5-6 ans qui ne donnent pas la bonne réponse. En comparant les deux groupes pour la 2^e condition, les chercheurs ont remarqué que des régions préfrontales étaient davantage activées chez les enfants de 9-10 ans. Ces activations préfrontales reflèteraient vraisemblablement l'implication de processus de contrôle cognitif et d'inhibition. Cela indiquerait que les enfants de 9 et 10 ans auraient développé cette capacité d'inhibition et que celle-ci permettrait un raisonnement de type logicomathématique plus efficace.

Les résultats de ces recherches appuient tous l'idée selon laquelle l'inhibition jouerait un rôle central dans certains apprentissages. D'abord, Kwon et Lawson (2000) ont étudié l'inhibition au niveau comportemental. Ils ont montré, en se basant sur l'exactitude des réponses des participants, que la capacité à inhiber des informations qui ne sont pas pertinentes aurait un impact sur l'apprentissage de concepts scientifiques liés à la pression de l'air. Il semblerait donc que l'inhibition puisse être impliquée dans l'apprentissage des sciences. Puis, les recherches subséquentes (Houdé, 2000, 2001, 2011; Stavy & Babai, 2010) ont porté sur l'inhibition au niveau cérébral. Les résultats de ces recherches montrent que le mécanisme cérébral de l'inhibition est impliqué dans plusieurs tâches de raisonnement logique ainsi qu'en mathématiques. L'étude de Kwon et Lawson (2000) ayant établi un lien entre l'inhibition et l'apprentissage des sciences, il semble intéressant de se pencher plus en détail sur cette relation en l'étudiant, cette fois-ci, au niveau du cerveau.

2.2.4 Le rôle de l'inhibition dans l'expertise en sciences

À ce jour, trois recherches se sont penchées précisément sur le lien existant entre

l'inhibition et l'expertise en sciences, et ce, pour trois disciplines précises : la mécanique, la chimie et l'électricité. Ces recherches supportent toutes l'idée selon laquelle l'expertise scientifique reposerait sur la mobilisation de régions cérébrales associées à l'inhibition. Selon cette hypothèse, les préconceptions des élèves ne seraient donc jamais supprimées de leur cerveau. Les experts en sciences auraient plutôt appris à inhiber ces préconceptions pour être en mesure de raisonner de façon scientifique.

Les recherches suivantes s'inscrivent dans le domaine de la neurodidactique des sciences, un sous-domaine de la neuroéducation qui étudie l'apprentissage et l'enseignement des sciences au niveau cérébral. Les chercheurs en neuroéducation, et plus spécifiquement en neurodidactique des sciences, choisissent souvent de comparer des participants novices et des participants experts de façon à mettre en évidence les différences entre ces deux groupes au niveau cérébral (activations cérébrales des experts – activations cérébrales des novices), et à faire ressortir ce qui caractérise l'expertise en sciences. Il est donc possible d'étudier le changement conceptuel, par le biais d'une comparaison entre des participants novices, que l'on considère comme n'ayant pas réalisé de changement conceptuel, et des participants experts, que l'on considère comme ayant réalisé un changement conceptuel.

2.2.4.1 Le domaine de la mécanique

Peu de recherches ont étudié spécifiquement les mécanismes cérébraux liés à l'apprentissage des sciences. Une recherche pilote (Dunbar et al., 2007) a cherché à déterminer l'impact de l'expertise scientifique sur le cerveau. Pour ce faire, les chercheurs ont sélectionné deux catégories de participants adultes. La première était constituée de participants novices qui étaient considérés comme n'ayant pas réalisé de changement conceptuel en physique mécanique. La deuxième était constituée de

participants experts que les chercheurs considéraient comme ayant réalisé un changement conceptuel. Les novices étaient des étudiants qui n'avaient jamais suivi de cours de physique au secondaire ou à l'université. Les experts devaient avoir suivi au moins cinq cours de physique de niveau universitaire. Dans le but de comparer les réactions cérébrales des deux groupes, on leur montrait, sur un écran, des films présentant deux balles de tailles différentes qui tombaient à des vitesses identiques ou différentes. Lors de la projection, les participants demeuraient étendus dans un appareil d'IRMf et deux types de films leur étaient présentés : des films *naïfs* dans lesquels les lois du mouvement de Newton n'étaient pas respectées (c'est-à-dire où des balles qui sont plus lourdes tombent plus rapidement), et des films *newtoniens* qui respectaient les lois du mouvement de Newton (c'est-à-dire où des balles plus lourdes tombent à la même vitesse que des balles plus légères). On leur demandait ensuite de juger si ces films étaient conformes ou non à la réalité, considérant qu'il n'y avait aucune résistance de l'air.

Lorsqu'on leur présentait des films naïfs, les participants novices affirmaient qu'ils étaient exacts et leur cortex frontal médial, qui serait lié aux représentations préexistantes du concept, selon les chercheurs de l'étude, était significativement plus activé par rapport aux autres conditions. Cela laisse supposer que les films naïfs étaient en accord avec les représentations antérieures des novices concernant la chute des balles. Lors de la présentation des films newtoniens, plusieurs des participants novices affirmaient que les films étaient erronés. Chez ces participants, le cortex cingulaire antérieur était activé, ce qui signifie que les données des films newtoniens entraient en contradiction avec leurs conceptions antérieures et que le cerveau les traitait comme des erreurs.

Lorsqu'on leur présentait des films naïfs, les participants experts affirmaient qu'ils étaient erronés, ce qui activait leur cortex cingulaire antérieur. Or, un élément

particulièrement intéressant est que leur cortex médial frontal était également activé, comme si leur représentation naïve selon laquelle les balles plus lourdes tombent plus rapidement n'avait pas disparu. Toujours selon les interprétations des auteurs de l'étude, ces résultats laissent supposer que les représentations antérieures des experts étaient inhibées par l'activation de la région du cortex cingulaire antérieur. Lors de la présentation des films newtoniens, on constatait que le cortex frontal médial des participants experts était également activé, ce qui voudrait dire que les représentations que ces derniers avaient acquises à la suite de leur éducation scientifique étaient sollicitées. Ces résultats suggèrent donc que les participants experts n'auraient pas restructuré leurs connaissances, mais qu'ils auraient plutôt appris à les inhiber afin de réaliser un changement conceptuel et de fournir une réponse plus adéquate du point de vue scientifique. Les résultats obtenus tendent ainsi à démontrer qu'un élève apprendrait à inhiber ses conceptions fréquentes pour réaliser un apprentissage plutôt que de les effacer, de les restructurer ou de les absorber dans une nouvelle théorie. Selon toutes ces interprétations, le processus d'apprentissage, que l'on percevait donc principalement comme une réorganisation conceptuelle, pourrait davantage se définir comme le développement de la capacité à inhiber nos conceptions spontanées.

2.2.4.2 Le domaine de la chimie

Une autre recherche pilote (Nelson, Lizcano, Atkins & Dunbar, 2007) s'est penchée sur les régions cérébrales associées à l'expertise en chimie. Les chercheurs voulaient vérifier si les résultats obtenus par Dunbar et son équipe (2007) étaient spécifiques au domaine de la mécanique ou si des résultats similaires seraient obtenus pour une autre discipline scientifique. Ils ont comparé deux groupes de participants : le premier groupe était constitué de 9 participants qui étaient des étudiants de niveau avancé en chimie (experts) et le 2^e groupe était formé de 10 participants qui n'étaient pas des

étudiants en chimie (novices). Les participants devaient juger de l'exactitude d'images représentant des molécules avant et après un changement de phase (de liquide à gaz). On leur disait qu'il s'agissait des molécules d'un liquide qui avait été chauffé jusqu'à ce qu'il s'évapore.

Les résultats obtenus par ces chercheurs montrent que les experts en chimie répondaient de façon correcte dans une très forte proportion et qu'ils activaient davantage des régions du cortex préfrontal dorsolatéral et ventrolatéral gauche associées, selon les auteurs de l'étude, à un traitement de l'information de nature sémantique et conceptuelle ainsi qu'à la mémoire de travail. Les novices, quant à eux, présentaient une proportion élevée de réponses incorrectes. Ils activaient davantage des régions cérébrales du cortex temporal inférieur et du cortex occipital, que l'on associe généralement à un traitement perceptuel de l'information. Les experts avaient donc tendance à s'appuyer plus fortement sur des stratégies impliquant la mobilisation de régions frontales du cerveau (en lien avec les fonctions exécutives) pour répondre à la tâche qui leur était proposée alors que les novices avaient plutôt recours à des stratégies perceptuelles (qui ne sont pas en lien avec les fonctions exécutives).

Bien que ces résultats ne soient pas identiques à ceux obtenus par Dunbar et son équipe (2007), ils ne vont pas à l'encontre de l'idée selon laquelle l'inhibition jouerait un rôle central dans l'apprentissage des sciences. Au contraire, ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par Houdé et al. (2000) dans le cadre de leur étude portant sur les erreurs de raisonnement logique, car ils permettent d'observer le passage d'une stratégie perceptuelle (novices) à une stratégie plus complexe impliquant la mobilisation de régions cérébrales du cortex préfrontal (ventrolatéral et dorsolatéral) liées à l'inhibition.

Ces résultats suggèrent donc que ce qui distingue un étudiant ayant réalisé un changement conceptuel d'un autre ne l'ayant pas réalisé est sa capacité à mobiliser des régions cérébrales permettant d'inhiber ses conceptions inappropriées au profit de conceptions scientifiques. Le mécanisme cérébral de l'inhibition jouerait également un rôle important dans l'apprentissage de concepts en chimie.

Les résultats des deux études précédentes, bien qu'intéressants, doivent néanmoins être interprétés avec prudence, car très peu d'informations sont disponibles quant à la méthodologie employée par les chercheurs et au type d'analyse réalisée. Par exemple, il n'est nulle part fait mention de la façon dont la tâche a été présentée, du nombre de stimuli utilisés, de la façon dont les données ont été prétraitées, des tests statistiques employés, des seuils statistiques choisis, etc. Il n'est pas non plus spécifié à quel type de comparaison les régions mentionnées réfèrent (une comparaison experts/novices, une comparaison stimuli naïfs/scientifiques, une combinaison des deux ou même autre chose). On ne dispose d'aucun détail concernant les participants sélectionnés et les caractéristiques de l'appareil d'IRM. De plus, mises à part les activations cérébrales mentionnées par les chercheurs, on ne sait pas si d'autres activations avaient été identifiées lors de l'analyse. Pour toutes ces raisons, il semble difficile de bien comprendre les résultats obtenus et de juger de leur pertinence et de leur portée. Il n'en demeure pas moins que cette piste concernant le rôle de l'inhibition dans l'apprentissage de concepts scientifiques en mécanique apparaît prometteuse.

2.2.4.3 Le domaine de l'électricité

Plus récemment, une recherche en neurodidactique des sciences (Masson, 2012) a été menée afin d'étudier sur les mécanismes cérébraux en jeu lors de l'apprentissage de conceptions scientifiques. Cette fois-ci cependant, l'activité cérébrale des participants était étudiée lors d'une tâche cognitive en électricité impliquant la conception

fréquente selon laquelle un seul fil est nécessaire pour allumer une ampoule. L'activité cérébrale de participants novices et experts a été comparée. Le groupe de novices était formé de 12 étudiants ne possédant aucune formation scientifique de niveau collégial ou universitaire. Il s'agissait d'étudiants universitaires en sciences humaines. Le groupe d'experts était composé de 11 étudiants au baccalauréat en physique. Les participants devaient évaluer l'exactitude de différents circuits électriques : ils devaient dire si le circuit électrique qui leur était présenté était correct ou incorrect (c'est-à-dire conforme ou non à ce qui arriverait dans la réalité). Certains circuits étaient naïfs (ils présentaient des circuits électriques dans lesquels un seul fil parvenait à faire allumer une ampoule) et d'autres étaient scientifiques (ils présentaient des circuits électriques conformes aux lois scientifiques).

Les résultats de cette recherche appuient ceux obtenus précédemment par Dunbar et al. (2007). En effet, les participants experts mobilisaient davantage certaines régions frontales du cerveau, telles que le cortex préfrontal (dorsolatéral et ventrolatéral) et le cortex cingulaire antérieur lorsqu'ils devaient évaluer des circuits naïfs. Ces régions du cerveau étant généralement associées à l'inhibition, les résultats de cette recherche suggèrent que les experts en sciences parviendraient à évaluer correctement les circuits naïfs parce qu'ils ont développé la capacité à inhiber leurs conceptions inappropriées en électricité. Il semblerait alors que la formation scientifique permette de développer la capacité à inhiber ses conceptions fréquentes. Le fait d'être un expert en électricité se caractériserait entre autres par le développement de cette capacité à inhiber, c'est-à-dire par cette faculté à activer certaines régions cérébrales responsables de l'inhibition.

Ainsi, les résultats de ces trois recherches permettraient d'établir un lien entre l'inhibition et l'expertise en sciences. Selon ces recherches, les experts en sciences

auraient encore accès à leurs anciennes conceptions naïves, mais ils auraient développé la capacité à les inhiber pour répondre de façon scientifique.

2.3 Hypothèses de recherche

S'inscrivant dans la continuité de ces études, la présente recherche se penchera sur le rôle de l'inhibition dans la capacité des élèves à surmonter leurs conceptions initiales en sciences, plus spécifiquement en mécanique. Au regard de cette discipline, la recherche préliminaire menée par Dunbar et son équipe (2007) a, selon nous, tenu un rôle précurseur et a notamment permis d'ouvrir la voie à l'établissement d'une hypothèse rattachant l'inhibition et l'expertise en mécanique. Il devient maintenant essentiel d'approfondir et de renforcer nos connaissances à ce sujet, d'autant plus que la mécanique représente un domaine pour lequel les conceptions des apprenants sont reconnues comme étant très résistantes au changement (Brown & Hammer, 2008).

Cette recherche tentera de répondre à la question suivante : est-ce que les experts en physique mécanique possèdent toujours de fausses conceptions qu'ils doivent inhiber? L'objectif principal de ce projet sera de vérifier si les experts en physique mécanique doivent inhiber leurs fausses conceptions pour fournir des réponses correctes d'un point de vue scientifique. Les objectifs spécifiques de ce projet concernent 1) l'identification des régions cérébrales propres aux novices et aux experts lors de l'évaluation de films liés à une conception fréquente en mécanique et 2) la comparaison des activations cérébrales (experts > novices) de façon à faire ressortir les régions cérébrales associées à l'expertise en physique mécanique.

L'hypothèse générale de cette recherche est que les conceptions initiales ne disparaissent pas lors d'un changement conceptuel. Selon cette hypothèse, un individu devrait donc apprendre à inhiber ses préconceptions (par le biais de la

mobilisation des régions du CCA et du cortex préfrontal) pour réaliser un changement conceptuel. Dans le cadre d'une tâche cognitive en mécanique impliquant une conception fréquente, une confirmation de cette hypothèse se traduirait par une plus grande activation des régions cérébrales associées à l'inhibition chez des participants experts (répondant correctement aux questions qui leur sont posées) comparativement à des participants novices (répondant de façon incorrecte).

De façon opérationnelle, l'analyse du contraste experts > novices devrait ainsi révéler, selon notre hypothèse, une activité cérébrale plus forte dans le CCA et dans le cortex préfrontal (dorsolatéral et ventrolatéral), reflétant ainsi la nécessité, chez les experts, d'inhiber leurs fausses conceptions pour répondre correctement.

CHAPITRE III

MÉTHODOLOGIE

Cette recherche s'inscrit dans la continuité de la recherche de Masson (2012) qui a fait l'étude des caractéristiques cérébrales de l'expertise en électricité. En effet, les éléments méthodologiques de la présente recherche reprennent essentiellement ceux élaborés par Masson. Cependant, le changement conceptuel est étudié, cette fois-ci, pour une discipline scientifique tout autre : la physique mécanique. Elle se penche plus précisément sur la conception erronée largement propagée selon laquelle les objets plus lourds tombent plus rapidement (Confrey, 1990; Wandersee et al., 1994).

Cette recherche a pour objectif principal de vérifier, à l'aide de la neuroimagerie, si les experts en physique mécanique possèdent toujours de fausses conceptions qu'ils doivent inhiber pour répondre de façon scientifique. Ce chapitre présente le devis méthodologique de la présente recherche selon les points suivants : les participants (sélection, recrutement et échantillonnage), la collecte de données (justification du choix de la technique de neuroimagerie, description de la tâche cognitive utilisée et d'une séance type de neuroimagerie) et les modalités d'analyse des données. Finalement, les considérations éthiques d'usage (consentement et confidentialité) sont abordées.

3.1 Participants

3.1.1 Caractéristiques générales des participants sélectionnés

Plusieurs critères de sélection ont été établis afin de circonscrire la population de cette

recherche. Ces critères touchent les caractéristiques suivantes : le sexe, l'âge, la préférence manuelle (gaucher ou droitier), le niveau de scolarité et les résultats scolaires.

Dans le cadre d'une recherche en neuroimagerie, il importe de réduire au minimum la variabilité cérébrale entre les sujets. Plusieurs facteurs peuvent être à l'origine de cette variabilité tels que le sexe (Cahill, 2006; Grabner, Fink, Stipacek, Neuper, & Neubauer, 2004; Grabner et al., 2007; Neubauer, Fink, & Schrausser 2002), l'âge et le fait d'être gaucher ou droitier (Good et al., 2001). Les participants sélectionnés dans le cadre de cette recherche sont donc tous des hommes droitiers, âgés de 18 à 30 ans.

De plus, afin de contrôler les effets possibles du niveau d'éducation, les participants de cette étude sont tous des étudiants universitaires au 1^{er} cycle. Les étudiants dont la moyenne universitaire est considérée comme étant atypique, c'est-à-dire inférieure à 2,3 ou supérieure à 4,1 sur 4,3, ont été exclus de la recherche. L'échantillon de cette recherche était composé de 29 participants.

Le diagramme suivant présente une synthèse de ces critères de sélection. Il permet de préciser les caractéristiques des individus qui participent à cette recherche.

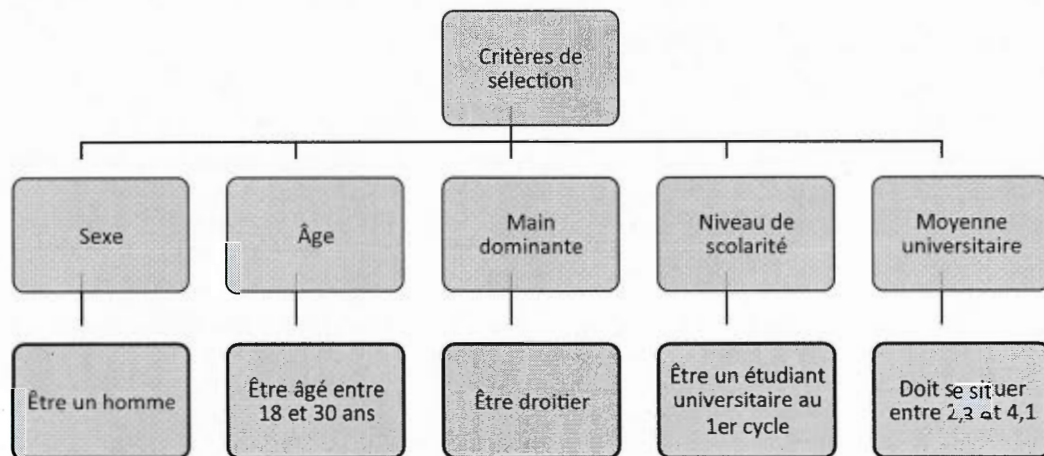


Figure 3.1 Critères de sélection servant à définir la population de l'étude.

3.1.2 Caractéristiques spécifiques des participants novices et experts

Pour être en mesure d'étudier les mécanismes cérébraux impliqués dans un changement conceptuel, la stratégie qui semble la plus évidente serait de comparer un même participant avant et après qu'il ait réalisé un tel changement. Cependant, procéder de cette façon implique en contrepartie certains désavantages, notamment la nécessité de conduire une recherche sur une plus longue période. Une solution plus réaliste consiste donc à mesurer le changement conceptuel de façon indirecte, par le biais d'une comparaison entre des participants novices, que l'on considère comme n'ayant pas réalisé de changement conceptuel, et des participants experts, que l'on considère comme ayant réalisé un changement conceptuel. Il est ainsi possible de mettre en évidence les différences entre ces deux groupes, au niveau cérébral, et de faire ressortir ce qui caractérise l'expertise dans un domaine précis. Cette stratégie de comparaison entre experts et novices est assez courante en neuroéducation. Elle a été utilisée en lecture (Beaulieu et al., 2005; Turkeltaub, Gareau, Flowers, Zeffiro, & Eden, 2003), en mathématiques (Grabner et al., 2007) et en sciences (Dunbar et al.,

2007; Masson, 2012; Nelson et al., 2007). Il s'agit également de la stratégie qui a été retenue dans le cadre de la présente recherche.

Deux groupes de participants ont été comparés : un groupe de novices n'ayant pas réalisé de changement conceptuel en physique mécanique et un groupe d'experts que l'on présume avoir réalisé ce changement conceptuel. Les participants novices ne devaient pas avoir fait d'études collégiales en sciences pures ou sciences de la nature et ils ne devaient pas non plus avoir suivi de cours optionnels de sciences au secondaire (tels que les cours de chimie et de physique de cinquième secondaire). Au moment du recrutement, ces participants étaient des étudiants universitaires en sciences humaines. Les participants experts devaient pour leur part être étudiants au baccalauréat en physique. Les deux groupes étaient donc similaires au niveau du sexe des participants, de leur âge, de leur préférence manuelle et de leur niveau général d'éducation, mais ils différaient par rapport à leur degré de formation en sciences et par rapport à la nature de leurs conceptions en mécanique.

3.1.3 Modalités de recrutement et échantillonnage

Le recrutement a eu lieu à l'Université du Québec à Montréal et à l'Université de Montréal. Avec l'accord de leur professeur, les étudiants ont été sollicités durant un de leurs cours universitaires. Les novices ont été recrutés dans le cadre de cours en sciences humaines (psychologie, science politique, histoire, philosophie, droit, etc.) alors que les experts ont été recrutés dans le cadre d'un cours faisant partie du cursus du baccalauréat en physique. Les grandes lignes du projet de recherche et la nature de leur implication (étapes à suivre, durée de leur engagement, etc.) leur ont été expliquées. Les étudiants qui souhaitaient participer au projet de recherche étaient invités à venir écrire leur nom ainsi que leurs coordonnées sur la feuille d'inscription. Ils étaient par la suite contactés et invités à répondre à un questionnaire (appendice A)

portant sur différentes questions scientifiques, dont certaines étaient similaires à celles utilisées dans la tâche cognitive (présentée à la section suivante). Le but de ce questionnaire était de vérifier : 1) si les novices recrutés étaient réellement d'un niveau « novice » en sciences, c'est-à-dire s'ils entretenaient des conceptions fréquentes en mécanique et 2) si les experts détenaient vraiment des conceptions scientifiques. Les novices devaient adhérer à la conception fréquente selon laquelle une balle plus lourde tombe plus rapidement qu'une balle plus légère (ce qui est incorrect). Les experts, quant à eux, devaient répondre de façon scientifique et ne devaient pas croire qu'une balle plus lourde tombe plus rapidement qu'une balle plus légère. Les questionnaires ont été réalisés individuellement de manière à ce que les participants ne puissent pas discuter des questions qui y étaient présentées. Lors de la rencontre de passation du questionnaire, on vérifiait également que la technologie de l'IRMf ne présentait pas de contre-indications pour les participants (appendice B) et ceux-ci remplissaient aussi le formulaire de consentement (appendice C). Les participants qui ne fournissaient pas les réponses attendues au questionnaire ou pour qui l'IRMf présentait une contre-indication (par exemple, les participants possédant des prothèses ou implants en métal, des clips artériels ou des stimulateurs cardiaques) étaient exclus de l'étude.

De plus, lors de la séance d'IRMf, les participants novices devaient répondre, dans une proportion d'au moins 90% de leurs réponses : 1) qu'il est correct qu'une balle plus lourde tombe plus rapidement et touche le sol avant une balle plus légère, 2) qu'il est incorrect qu'une balle plus lourde et une balle plus légère tombent à la même vitesse et touchent le sol en même temps et 3) qu'il est incorrect qu'une balle plus légère tombe plus rapidement qu'une balle plus lourde et touche le sol avant celle-ci. Les participants experts devaient quant à eux répondre de façon scientifique à au moins 90% des questions posées. Les participants (experts et novices) qui ne répondaient pas tel qu'attendu étaient exclus de l'étude, le but n'étant pas seulement

de comparer des participants de niveaux « novice » et « expert », tel qu'indiqué par leur niveau de formation en science, mais bien de comparer des participants qui fournissaient réellement des réponses novices et expertes lorsqu'on leur posait des questions en mécanique.

La participation au projet de recherche était volontaire et les participants ne recevaient aucune compensation financière. Une image de leur cerveau leur était offerte afin de les remercier de leur implication.

Le recrutement des participants experts avait déjà été réalisé dans le cadre de la recherche de Masson (2012). Entre décembre 2008 et mars 2009, ce dernier a visité sept classes et a rencontré près de 100 étudiants. Parmi ceux-ci, 20 répondaient à tous les critères de sélection et se sont portés volontaires pour participer à l'étude. 15 de ces étudiants ont été disponibles pour répondre au questionnaire et 13 ont répondu correctement, c'est-à-dire de façon scientifique, aux questions. Ces participants, étudiants au baccalauréat en physique, présentaient à la fois une expertise en mécanique et en électricité (ce qui a permis de les faire participer à la fois à une étude portant sur l'apprentissage de l'électricité et à la présente étude portant sur l'apprentissage de la mécanique). Au total, 12 participants ont accepté de réaliser l'examen de neuroimagerie et 10 participants ont répondu correctement lors de la séance d'IRMf. Le groupe d'experts en mécanique de cette recherche était donc composé de 10 participants.

Le recrutement des participants novices a été réalisé de la même façon entre les mois de septembre et novembre 2011. Près de 1000 étudiants provenant de 20 classes de différents baccalauréats en sciences humaines ont été rencontrés. Parmi les étudiants répondant à tous les critères de sélection (hommes, droitiers, âgés de 18 à 30 ans, n'ayant suivi aucun cours optionnel en science et possédant une moyenne

universitaire entre 2,3 et 4,1), 64 étudiants se sont portés volontaires et ont communiqué leurs coordonnées au recruteur. De ces 64 étudiants, 49 se sont présentés au rendez-vous pour répondre au questionnaire et 12 ont répondu de façon non-scientifique, c'est-à-dire en affirmant qu'une balle plus lourde tombera plus rapidement qu'une balle plus légère. Ces 12 participants ont ensuite réalisé un examen de neuroimagerie et tous ont répondu adéquatement lors de cet examen. De plus, il a été possible d'utiliser les données cérébrales de 7 participants novices qui avaient été recrutés dans le cadre de la recherche de Masson (2012), car ces derniers présentaient un profil de réponse non scientifique à la fois en électricité et en mécanique. Le groupe de novices de cette recherche était donc composé de 19 participants.

Le tableau suivant résume les principales caractéristiques de chacun des groupes.

Tableau 3.1 Synthèse des caractéristiques des deux groupes de participants.

Novices (n = 19)	Experts (n = 10)
Droitiers	Droitiers
Hommes	Hommes
Moyenne de 23,53 ans (ET = 2,8)	Moyenne de 22,30 ans (ET = 2,4)
Étudiants de 1 ^{er} cycle	Étudiants de 1 ^{er} cycle
Étudiants en sciences humaines	Étudiants en physique
Conceptions non scientifiques (> 90%)	Conceptions scientifiques (> 90%)

Les deux groupes se distinguaient donc par le niveau de formation scientifique des participants ainsi que par la nature des conceptions de ces derniers.

3.2 Collecte de données

3.2.1 Choix de la technique d'imagerie cérébrale : l'IRMf

Plusieurs techniques d'imagerie cérébrale permettent d'observer le cerveau pendant qu'un individu réalise une tâche de nature cognitive. Ces techniques comportent toutes des avantages et des inconvénients et il semble donc difficile de dire laquelle est la meilleure dans l'absolu. Le choix d'utiliser une technique précise dépend de plusieurs facteurs, notamment de l'objectif de la recherche, des régions cérébrales que l'on souhaite observer, des mesures à prendre, du *design* de la tâche cognitive, etc.

Dans le cadre de cette étude, la technologie choisie est celle de l'IRMf. Ce choix se justifie en regard de plusieurs critères :

- Il s'agit d'une technologie non invasive (c'est-à-dire qui n'implique pas l'utilisation de marqueurs radioactifs et donc qui n'irradie pas le sujet).
- Cette technologie présente une excellente résolution spatiale (de l'ordre du mm) et une bonne résolution temporelle (de l'ordre de la seconde). Elle permet donc d'obtenir des images de l'activité cérébrale bien définies et de suivre l'évolution de cette activité à travers le temps de façon suffisamment précise.
- Elle permet d'étudier l'activation de régions cérébrales profondes comme le CCA.
- Les risques liés à son utilisation sont négligeables.
- Il s'agit d'une technologie qui permet l'utilisation d'un protocole évènementiel lors de la présentation de la tâche cognitive (cet aspect sera abordé plus en détail à la section 3.2.2).

Depuis une dizaine d'années, l'IRMf a gagné en popularité et a pris le relais d'autres techniques qui étaient jusqu'alors plus utilisées, telle que la TEP. L'appareil d'IRMf (voir figure 3.2) est composé d'un aimant supraconducteur créant un champ magnétique puissant et stable (dont l'intensité varie généralement entre 1,5 et 3 Teslas), de trois bobines de gradient de champ magnétique qui permettent la localisation spatiale en faisant varier l'intensité du champ magnétique selon un axe spécifique (x, y ou z) et d'antennes qui captent le signal (Amaro & Barker, 2006; Ward, 2010).

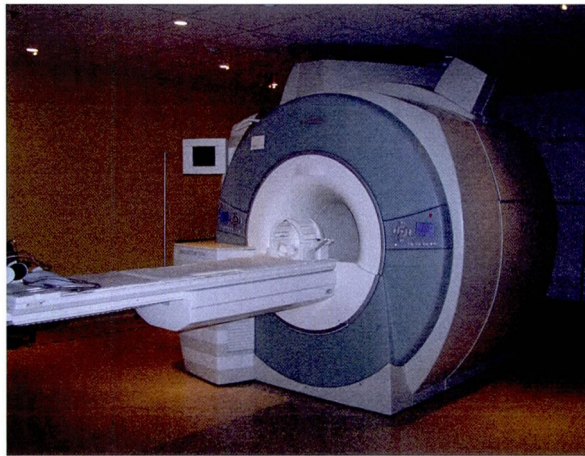


Figure 3.2 Appareil d'IRMf de l'Unité de neuroimagerie fonctionnelle appartenant au Centre de recherche de l'Institut universitaire de gériatrie de Montréal.

Le principe physiologique sur lequel repose le fonctionnement de l'IRMf est le suivant : le cerveau a besoin d'oxygène pour fonctionner et cet oxygène lui est principalement acheminé par le sang. Lorsque l'activité métabolique des neurones d'une région cérébrale augmente, ceux-ci ont besoin de plus d'oxygène. Cette demande accrue en oxygène entraîne une dilatation des vaisseaux et une augmentation locale du débit sanguin ce qui a pour effet d'accroître l'approvisionnement en sang de cette région cérébrale afin de combler la demande. Or, lorsque les neurones consomment l'oxygène, ils transforment l'hémoglobine

oxygénée (oxyhémoglobine) en hémoglobine désoxygénée (désoxyhémoglobine) qui possède des propriétés magnétiques différentes. Ces propriétés créent des distorsions dans le champ magnétique stable de l'appareil et peuvent être mesurées (Amaro & Barker, 2006). L'IRMf est donc sensible à la concentration d'oxygène dans le sang (c'est-à-dire au ratio hémoglobine oxygénée/hémoglobine désoxygénée). Une fluctuation de cette concentration engendre une variation du signal capté qui indique une variation de l'activité cérébrale. On nomme ce principe l'effet BOLD (*Blood-oxygen-level-dependent*). Il est ainsi possible d'identifier, par le biais de cette variation du flux sanguin, les régions cérébrales qui sont les plus activées lors de la réalisation d'une tâche cognitive précise. On associe alors ces régions à cette activité cognitive.

Cependant, les neurones du cerveau étant en constante activité, il serait inutile de simplement observer quelles régions reçoivent de l'oxygène, car elles en reçoivent toutes à différents degrés et en tout temps. Lorsque l'on réalise un examen de neuroimagerie à l'aide de l'IRMf et que l'on affirme par la suite qu'une région était activée lors de la réalisation d'une tâche cognitive, cela signifie en réalité que l'activation de cette région avait augmenté durant la tâche par rapport à son niveau de base (Ward, 2010). Il importe donc, lors d'une séance d'IRMf, de prendre à la fois des mesures de l'activité cérébrale d'un participant lors d'une période de repos (pour déterminer son niveau de base) et lors de la réalisation de la tâche afin de pouvoir observer la différence d'activation entre ces deux états et d'identifier les régions cérébrales qui sont les plus activées.

L'appareil d'imagerie cérébrale utilisé dans le cadre de cette recherche est celui de l'Unité de neuroimagerie fonctionnelle (UNF) du Centre de recherche de l'Institut universitaire de gériatrie de Montréal. Cet appareil est un Siemens TRIO TIM dont l'intensité du champ magnétique est de 3 teslas. L'antenne utilisée possède 12

canaux. Des images du cerveau des participants ont été prises pendant que ces derniers étaient étendus à l'intérieur de l'appareil d'IRMf et qu'ils réalisaient une tâche cognitive en mécanique présentée sur un écran.

3.2.2 Tâche cognitive

La tâche cognitive utilisée dans le cadre de cette recherche est la même que celle qui a été utilisée dans le cadre de la recherche de Masson (2012). Elle comprend à la fois des stimuli en mécanique et en électricité, les stimuli en électricité étant intercalés de façon aléatoire entre les stimuli en mécanique. Cependant, alors que Masson s'était intéressé spécifiquement aux stimuli en électricité, seules les réponses et activations liées aux stimuli en mécanique seront utilisées et analysées dans le cadre de la présente recherche. La tâche cognitive a été conçue à l'aide du logiciel E-Prime (Psychology Software Tools, Inc.) qui permet de présenter une série de stimuli sur un écran et de mesurer avec précision certaines données comportementales telles que le temps de réaction et l'exactitude des réponses des participants. La tâche a été construite de façon à respecter les nombreuses contraintes qu'impose l'utilisation de l'IRMf. Ces contraintes proviennent principalement : 1) du bruit qu'émet l'appareil, 2) de l'obligation pour les participants de demeurer immobiles (surtout au niveau de la tête) en répondant aux questions, 3) de la mince variation du signal mesuré, combinée à un faible rapport signal sur bruit et 4) du délai de la réponse hémodynamique (c'est-à-dire du délai entre l'activation des neurones et l'augmentation de la concentration d'oxyhémoglobine qui fait varier le signal mesuré en IRMf).

Le bruit important qu'émet l'appareil rend en effet très difficile l'utilisation de stimuli auditifs (Amaro et Barker, 2006) et les recherches impliquant l'IRMf préconisent généralement l'utilisation de stimuli visuels. Ces stimuli sont présentés sur un écran et les participants peuvent voir l'écran par le biais d'un miroir, placé devant eux, qui

projette l'image de cet écran. De plus, lors d'une séance de neuroimagerie, les participants sont allongés dans l'appareil et ils doivent demeurer le plus immobiles possible durant l'acquisition des images (la tête devant demeurer complètement immobile), car même un mouvement de la tête de quelques millimètres peut avoir pour effet de nuire à la qualité des images collectées et parfois même de les rendre inutilisables. Pour éviter que les participants ne bougent la tête, il est préférable de ne pas leur demander de répondre oralement aux questions qui leur sont posées. Dans le cadre de cette étude, les participants répondaient à des questions à choix de réponse en appuyant manuellement sur les boutons d'une boîte de réponse. La mince variation du signal mesurée combinée au faible rapport signal sur bruit représente une autre contrainte importante qui implique de présenter un nombre minimum de stimuli pour chaque condition à l'étude afin d'obtenir des différences qui sont statistiquement significatives. On estime généralement à 20 le nombre minimum de stimuli qui doivent être présentés. Finalement, le délai de la réponse hémodynamique fait en sorte qu'il est nécessaire de déterminer une durée de présentation des stimuli et de pause suffisante.

La tâche cognitive utilisée dans la présente recherche consistait en la présentation de trois types de films : des films naïfs (non conformes aux lois du mouvement de Newton), des films newtoniens (conformes aux lois du mouvement de Newton) et des films contrôle (pour lesquels les connaissances scientifiques en mécanique n'étaient pas impliquées). Ces trois types de films représentaient les trois conditions de la tâche. Les stimuli visuels utilisés dans la tâche étaient formés de deux balles de grosseurs différentes (une grosse et une petite) composées du même matériau : le plomb (la plus grosse balle étant donc plus lourde que la plus petite, mais les deux étant assez lourdes pour que la résistance de l'air soit négligeable). Ces balles pouvaient tomber à des vitesses identiques ou différentes. Les films naïfs étaient conformes aux conceptions inappropriées des novices (la balle plus lourde tombait plus rapidement

et touchait le sol avant la balle plus légère). Les films scientifiques étaient conformes aux conceptions des experts (la balle plus lourde et la balle plus légère tombaient à une vitesse identique et touchaient le sol en même temps) et les films contrôle présentaient une situation à laquelle les novices et les experts étaient censés répondre de façon identique (la balle plus légère tombait plus rapidement et touchait le sol avant la balle la plus lourde). Les participants devaient juger si les films qui leur étaient présentés étaient corrects ou incorrects. Ils répondaient en appuyant sur un bouton de la boîte de réponse avec l'index de la main droite (pour une réponse correcte) ou avec le majeur de la main droite (pour une réponse incorrecte).

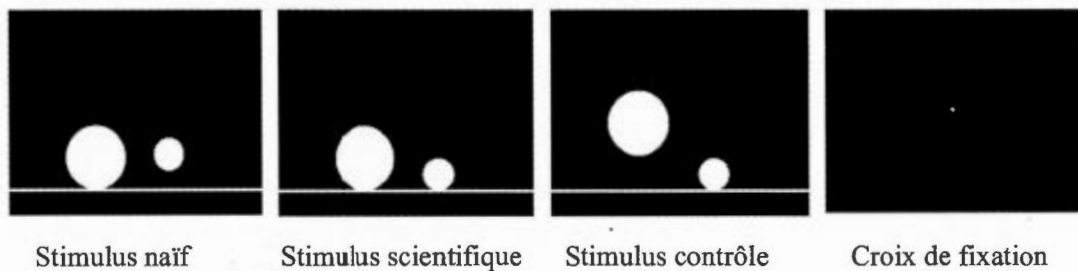


Figure 3.3 Types de stimuli en mécanique utilisés dans la tâche cognitive.

Les stimuli étaient présentés selon un protocole événementiel (*event-related design*), c'est-à-dire que l'ordre de présentation des stimuli associés aux différentes conditions (films naïfs, films scientifiques, films contrôle) était aléatoire (Ward, 2010). L'utilisation d'un protocole en bloc (*block design*) consistant à présenter tous les stimuli d'une même condition de façon regroupée (Ward, 2010) n'aurait pas été possible, car les participants auraient été en mesure de prédire les réponses aux questions.

La présentation d'un stimulus commençait par l'apparition des deux balles en haut de l'écran. Ces deux balles demeuraient immobiles pendant 1,5 seconde. Puis, les deux balles tombaient et l'une des deux balles touchait le sol en premier ou les deux balles

touchaient le sol en même temps. Lorsque le participant répondait en appuyant sur un bouton de la boîte de réponse, une croix de fixation apparaissait et celle-ci était présentée pendant 2,5 secondes ou 3,0 secondes. Cette période de repos avait pour objectif de laisser la réponse hémodynamique redescendre et la durée de la période de repos n'était pas toujours identique afin d'éviter que le cerveau ne s'habitue à une durée fixe. Chaque stimulus, peu importe la condition à laquelle il appartenait, était donc toujours suivi d'une période de repos. De plus, la croix de fixation apparaissait automatiquement après 4,0 secondes si le participant n'avait pas répondu au stimulus. Des périodes de repos plus longues, d'une durée de 6,0 secondes, étaient également intégrées dans la tâche.

La tâche cognitive était divisée en deux séries équivalentes formées des différents types de stimuli et des périodes de repos. Chacune des séries était composée de 20 stimuli pour chaque condition (20 X 3) ainsi que de 20 périodes de repos. Les deux séries étaient séparées par une pause d'environ trois minutes.

La stratégie soustractive a été préconisée dans le cadre de cette recherche. Cette stratégie permet de comparer différentes conditions ou différents groupes, dans ce cas-ci, experts et novices, afin d'identifier les régions cérébrales qui sont les plus activées pour une condition ou un groupe précis (Amaro et Barker, 2006). Pour cette recherche, le principal contraste étudié sera celui entre les experts et les novices, et ce, pour chacune des conditions (films naïfs, films scientifiques, films contrôle, période de repos). Le contraste permettant de répondre le plus directement à la question de recherche est celui qui se penche sur les régions cérébrales qui sont les plus activées chez les participants experts (experts > novices), lors de la présentation des films naïfs qui confrontent directement les participants à la conception fréquente.

3.2.3 Réalisation de l'examen de neuroimagerie : description d'une séance type

Cette section présente les principales étapes des séances d'IRMf qui ont eu lieu dans le cadre de la présente étude. Le déroulement de ces séances suivait un protocole précis qui avait été élaboré de façon à ce que tous les participants passent par les mêmes étapes et reçoivent les mêmes consignes. La durée totale de la participation à ce projet de recherche était d'environ 2 heures, incluant les étapes préparatoires à l'examen d'IRMf.

3.2.3.1 Étape 1 : accueil des participants et explication de la séance

Lorsque les participants arrivaient à l'UNF, ils étaient accueillis et invités à s'asseoir dans la salle d'attente. Le déroulement de la séance d'IRMf leur était expliqué et le formulaire de consentement était revu avec eux, puis signé. Le formulaire de dépistage était également relu et signé afin de s'assurer qu'aucun changement n'avait eu lieu au niveau de leur condition médicale. Le technologue en fonction revoyait également ce formulaire avec le participant avant l'acquisition des données. Il était également important de vérifier, lors de cette étape, que le participant ne portait aucun élément contenant du métal.

3.2.3.2 Étape 2 : présentation des consignes et séance d'entraînement

Une fois l'étape 1 complétée, le participant était invité à se déplacer vers la salle de simulation, laquelle contenait un simulateur de l'appareil d'IRMf. Il s'agit d'un appareil qui ressemble au véritable appareil d'IRMf, mais qui ne prend pas d'images du cerveau des participants. Dans un premier temps, les consignes liées à la tâche étaient présentées au participant à l'aide d'un film, de façon à s'assurer que tous les participants recevaient exactement les mêmes consignes. Ces consignes expliquaient au participant comment répondre en utilisant la boîte de réponse, présentaient les

particularités de la tâche (présentation de films suivis de périodes de repos) et montraient des exemples de films afin que le participant s'habitue à l'aspect visuel des stimuli qui allaient lui être présentés.

Dans un deuxième temps, le participant réalisait une séance d'entraînement à l'extérieur du simulateur qui reprenait une dizaine de stimuli similaires à ceux présentés dans la tâche réelle. La tâche d'entraînement était présentée sur un écran d'ordinateur et le participant répondait en utilisant la boîte de réponse. Ce premier entraînement avait pour objectif que le participant se familiarise avec la tâche cognitive (stimuli présentés, rythme de présentation, temps de réponse, périodes de repos, etc.) ainsi qu'avec l'utilisation de la boîte de réponse. Puis, le participant réalisait une deuxième séance d'entraînement en répondant de nouveau à la tâche, mais cette fois-ci, à l'intérieur du simulateur. Les objectifs de cet entraînement étaient : 1) de vérifier que le participant n'était pas claustrophobe et qu'il était capable de demeurer dans le tunnel de l'appareil malgré l'espace restreint et 2) que le participant soit capable de répondre à la tâche cognitive en demeurant le plus immobile possible.

3.2.3.3 Étape 3 : acquisition des images

Une fois cette étape d'entraînement terminée, le participant était invité à se déplacer dans la salle d'IRMf. Avec l'aide d'un technologue, le participant s'allongeait sur la table de l'appareil. Des bouchons étaient placés dans ses oreilles et un casque d'écoute était aussi installé afin d'atténuer le bruit de l'appareil. Le casque d'écoute permettait également au participant de communiquer avec l'expérimentateur qui se trouvait dans la salle de contrôle adjacente. Le technologue s'assurait que la tête du participant était bien positionnée et des coussins étaient placés de chaque côté de sa tête afin de minimiser les risques de mouvements lors de l'acquisition des images.

Cette acquisition se déroulait en trois temps. On présentait d'abord au participant les stimuli de la 1^{ère} série qui était composée de 10 films naïfs, 10 films scientifiques, 10 films de contrôle et 10 périodes de repos de 6 secondes (en plus des périodes de repos entre les stimuli). Des images fonctionnelles (T2*) du cerveau du participant étaient acquises alors que ce dernier répondait à la tâche. Cette étape durait environ 7 minutes. Puis, après une pause d'environ 3 minutes, on présentait au participant les stimuli de la 2^e série (toujours composée de 10 films naïfs, 10 films scientifiques, 10 films de contrôle et 10 périodes de repos de 6 secondes) et des images fonctionnelles (T2*) étaient également acquises durant cette série. Cette étape durait aussi près de 7 minutes. Finalement, dans le but de localiser adéquatement les activations cérébrales, des images structurales (T1) du cerveau étaient acquises alors que le participant était au repos. L'acquisition de ces images structurales prenait environ 10 minutes. La durée totale de l'acquisition des données était donc d'environ 30 minutes. Les paramètres d'acquisition des images fonctionnelles et structurales sont présentés à l'appendice D.

3.2.3.4 Étape 4 : raccompagnement des participants

Une fois la séance d'IRMf terminée, les participants étaient invités à aller se changer et étaient raccompagnés à la salle d'attente. L'expérimentateur s'assurait que le participant se sentait bien et prenait en note ses commentaires, s'il y avait lieu. Le participant était finalement remercié d'avoir participé à l'étude. Une photo de son cerveau lui était envoyée par courriel dans la semaine suivant l'expérimentation.

3.3 Analyse des données

L'analyse des données comportementales et neurologiques a été réalisée en janvier 2013. Les données comportementales (temps de réaction et exactitude des réponses)

ont été analysées à l'aide du logiciel SPSS (Kinnear & Gray, 2011). Les données cérébrales recueillies ont quant à elles été analysées de façon à mettre en évidence les différences cérébrales entre le groupe des novices et celui des experts pour les différentes conditions. Il s'agissait de voir quelles régions étaient les plus activées pour chacun des groupes. Le logiciel utilisé pour traiter les données cérébrales recueillies est SPM8 développé par le Wellcome Department of Imaging Neuroscience et fonctionnant avec MATLAB (pour plus d'informations, voir Ashburner, 2012).

Avant de procéder à l'analyse même des données cérébrales, plusieurs étapes de prétraitement ont été nécessaires. Ces étapes (correction du mouvement, normalisation et lissage) sont présentées dans la section qui suit.

3.3.1 Étapes de prétraitement

3.3.1.1 Correction du mouvement

D'un participant à l'autre, le positionnement de la tête dans l'appareil d'IRMf peut varier légèrement. Il est également possible qu'un participant bouge un peu la tête durant l'acquisition des images entraînant alors un déplacement de la position des régions activées. Ces différences doivent être corrigées de façon à ce qu'une région cérébrale demeure à la même position durant toute la période d'acquisition des images. Dans le cadre de cette recherche, l'algorithme qui a été utilisé est celui de SPM8, qui permet d'aligner les images obtenues par rapport à une image de référence. La correction du mouvement a donc été faite à partir de l'image moyenne (Friston, Williams, Howard, Frackowiak, & Turner, 1996) calculée par SPM.

3.3.1.2 Normalisation

Le problème principal que l'on rencontre lorsqu'on analyse les données d'imagerie fonctionnelle est celui des différences individuelles. En effet, d'un participant à l'autre, certaines différences cérébrales peuvent être constatées, notamment au niveau de la taille ou de la forme du cerveau. Comme on souhaite étudier des régions cérébrales précises, ces différences, bien qu'elles ne soient pas considérables, peuvent avoir une incidence lors de l'analyse des données, surtout si l'on souhaite comparer l'activité cérébrale de plusieurs sujets ou en faire une moyenne. Le processus de normalisation permet de localiser les régions cérébrales de chaque individu sur un cerveau de référence, à l'aide des coordonnées spatiales de ses voxels. Pour ce faire, le logiciel identifie et délimite les contours du cerveau du participant et normalise l'image de ce dernier afin qu'il devienne similaire au cerveau de référence. Dans le cadre de cette recherche, les données ont été normalisées en utilisant la méthode de la segmentation (Ashburner & Friston, 2005) et le cerveau de référence qui a été utilisé est celui du Montreal Neurological Institute disponible dans SPM8.

3.3.1.3 Lissage

Le processus de lissage constitue une étape importante, car il permet d'améliorer le rapport signal sur bruit. Il s'agit en fait de répartir le signal ou l'activité d'un voxel du cerveau à ses voxels voisins. Plus le voxel voisin est proche, plus celui-ci « reçoit » du signal. Un voxel qui ne serait pas ou peu activé, mais qui serait situé dans une région cérébrale où tous les voxels voisins sont fortement activés deviendrait lui aussi plus activé après le lissage. À l'inverse, un voxel fortement activé, mais situé dans une région où aucun voxel voisin n'est très activé détiendrait un signal moins élevé à la suite du lissage. L'activité de certains voxels peut donc être renforcée ou réduite, selon l'activation des voxels environnants (Ward, 2010). Cela permet ainsi de réduire

les risques de considérer des artefacts comme étant des régions significativement activées alors qu'il ne s'agit en fait que de bruit. De plus, le lissage est particulièrement utile lorsque l'on souhaite comparer les activations cérébrales de plusieurs individus, car il facilite la détection de régions cérébrales qui sont activées chez plusieurs sujets. Il peut également améliorer la validité des analyses statistiques subséquentes (Huettel, Song, & McCarthy, 2004). Dans le cadre de cette recherche, le lissage a été réalisé via un filtre gaussien d'une largeur de 8 mm, à la moitié de la hauteur maximale (*full-width-half-maximum*). La largeur du filtre fait référence à la distance jusqu'à laquelle ce dernier fait effet.

3.3.2 Traitement des données

Une fois toutes ces étapes de prétraitement réalisées, le traitement des données a pu avoir lieu. Les analyses statistiques qui ont été réalisées se sont basées sur le modèle linéaire général (Huettel et al., 2004). Ce modèle postule qu'il est possible d'estimer ou de prédire la valeur des données observées en combinant, de façon linéaire, plusieurs facteurs ou variables explicatives (qui détiennent différentes pondérations) ainsi qu'une certaine valeur d'erreur. La pondération de ces facteurs indique dans quelle mesure ceux-ci contribuent à l'obtention des données.

Ce modèle est généralement représenté par la formule suivante :

$$y = \beta_0 + \beta_1\chi_1 + \beta_2\chi_2 + \dots + \beta_n\chi_n + \varepsilon$$

Dans cette formule, y représente les données expérimentales qui sont observées, χ représente un facteur, β constitue la pondération de ce facteur et ε symbolise l'erreur (c'est-à-dire la variabilité des données que le modèle ne permet pas d'expliquer).

Pour analyser les données, il a été nécessaire, dans un premier temps, de déterminer quelles régions cérébrales étaient significativement activées à l'aide d'un test-t. Puis, un test-t a également été réalisé afin de vérifier s'il existait une différence significative entre deux régions ou deux groupes.

Le seuil de significativité choisi est de $p = 0,001$ (Grabner, 2009; Masson, 2012). Ce seuil constitue un compromis intéressant entre un seuil trop large ($p = 0,05$) qui entraînerait la détection d'un trop grand nombre d'activations (erreur de type I) et un seuil trop strict ($p = 0,000\ 000\ 5$) qui ne permettrait pas la détection de toutes les activations pertinentes (erreur de type II). Ce seuil a été utilisé principalement lors de la comparaison des conditions (voir tableau 4.4 et figure 4.2). Par ailleurs, pour les comparaisons des groupes (tableau 4.3 et figure 4.1), le seuil plus strict de $p = 0,000\ 5$ a été privilégié, car un trop grand nombre d'activations étaient détectées avec le seuil de $p = 0,001$. Cependant, le seuil corrigé (Huettel et al., 2004) n'a pu être utilisé pour aucune des comparaisons étant donné le nombre limité de participants faisant partie du groupe des experts.

L'objectif étant de comparer deux groupes de participants (novices et experts), il a été nécessaire d'effectuer la moyenne des résultats pour chacun de ces groupes. Pour ce faire, il a fallu, dans un premier temps, réaliser une analyse de 1^{er} niveau, que l'on nomme aussi analyse intra-sujet ou analyse à effets fixes, à l'aide de SPM8, de façon à combiner les résultats obtenus pour chaque participant au cours des séries 1 et 2. Cette analyse a ainsi permis d'obtenir une carte statistique complète de l'activité cérébrale de chaque participant pour chacun des contrastes (ou comparaisons) d'intérêt permettant de répondre aux questions de recherche.

Puis, afin de déterminer l'activité cérébrale moyenne de chaque groupe, une analyse de deuxième niveau (ou analyse à effets aléatoires) a été réalisée par le biais d'un test

t à deux échantillons indépendants. Contrairement aux analyses à effets fixes, les analyses à effets aléatoires permettent de généraliser les résultats obtenus à l'ensemble de la population à l'étude.

Ce type d'analyse est le plus approprié, car pour qu'une différence significative soit observée, il est essentiel qu'un grand nombre de sujets aient réagi significativement aux stimuli. Réaliser une analyse de premier niveau n'aurait pas été optimal étant donné que ce type d'analyse, sensible aux données extrêmes, peut conduire à l'obtention d'une différence significative pour l'ensemble du groupe, même si l'effet observé n'est pas présent chez tous les participants. L'analyse de deuxième niveau a donc été préconisée dans le cadre de cette recherche dans le but de comparer novices et experts.

3.4 Considérations éthiques

3.4.1 Utilisation de l'IRMf

La technologie utilisée, l'IRMf, est sécuritaire et éprouvée. En effet, selon les connaissances actuelles, la participation à un examen d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle n'entraîne aucun risque sur le plan médical, si le participant ne présente pas de contre-indication. Il est possible que les participants aient pu ressentir un certain inconfort dû au bruit important de l'appareil, mais des bouchons ainsi qu'un casque d'écoute ont permis d'atténuer considérablement le niveau de bruit. Les participants avaient d'ailleurs été prévenus, avant l'acquisition des données, que l'appareil émettait un bruit important et l'expérimentateur leur a tous fait écouter à l'avance les types de bruits émis par l'appareil, ceux-ci ayant été enregistrés, puis présentés à l'ordinateur. Cela avait pour objectif de diminuer le stress qu'auraient pu éprouver certains participants en entendant des bruits qui leur étaient inconnus.

De plus, le sentiment de claustrophobie que peut provoquer le fait d'être allongé à l'intérieur de l'appareil d'IRMf a été minimisé par la séance d'entraînement dans le simulateur.

3.4.2 Obtention d'un consentement éclairé

Les sujets de cette étude ont tous participé de façon volontaire. Ils ont été avisés clairement qu'ils avaient le droit, à tout moment, de se retirer du projet, et ce, sans fournir aucune justification ni subir aucune pénalité.

Les participants ont tous signé un formulaire de consentement qui avait été préalablement approuvé par les comités éthiques de l'Université du Québec à Montréal et de l'UNF (Comité mixte d'éthique de la recherche du Regroupement Neuroimagerie/Québec). Le formulaire de consentement a été lu par le participant. Les termes de ce formulaire ont été expliqués au participant et l'expérimentateur a répondu à toutes les questions de ce dernier. Une copie signée du formulaire a également été remise au participant.

3.4.3 Respect de la confidentialité et de l'anonymat

Les renseignements recueillis dans le cadre de cette recherche sont confidentiels. Les participants ont été identifiés par un numéro de code et la clé du code reliant le nom du participant à son dossier de recherche est conservée par le chercheur responsable du projet de recherche dans un lieu sécuritaire. De plus, afin de préserver l'anonymat de chacun, aucune publication ou communication scientifique ne renfermera d'éléments d'information pouvant permettre d'identifier un participant.

CHAPITRE IV

RÉSULTATS

Ce chapitre présente les principaux résultats obtenus à la suite de l'analyse des données. Dans un premier temps, les résultats comportementaux (taux de réussite et temps de réaction des participants) sont abordés. Dans un deuxième temps, les résultats neurologiques sont présentés de façon à mettre en évidence les régions cérébrales qui sont significativement plus activées chez un groupe (experts ou novices) par rapport à l'autre, ainsi que pour une condition (stimuli naïfs, scientifiques ou contrôle) par rapport à une autre. L'objectif principal de cette recherche étant de vérifier si les experts en mécanique détiennent toujours de fausses conceptions qu'ils doivent inhiber, seuls les résultats permettant le mieux de répondre à cette question sont présentés. L'accent est donc mis sur la comparaison des groupes de novices et d'experts, principalement pour la condition *stimuli naïfs*. Les résultats sont finalement discutés et interprétés de façon à établir des liens entre les principales activations cérébrales observées et les hypothèses de la présente recherche.

4.1 Résultats comportementaux

Le tableau 4.1 présente les taux de réussite des participants novices et experts pour chacun des types de stimuli présentés : naïfs, scientifique et contrôle. Pour chaque type de stimuli, les taux de réussite minimum et maximum, l'écart-type ainsi que le taux de réussite moyen ont été calculés. Pour les stimuli naïfs, le taux de réussite moyen des novices est de 0,74/20, ce qui n'est pas surprenant puisque ces participants avaient répondu de façon non-scientifique au questionnaire de sélection visant à évaluer leurs connaissances en science. Le taux de réussite moyen des experts est

quant à lui de 18,80/20 (ces derniers avaient fourni des réponses scientifiquement correctes au même questionnaire de sélection). Le test-t effectué sur les moyennes révèle qu'il existe une différence significative entre ces deux groupes ($t(27) = 33,55$, $p < 0,001$) et, selon les balises établies par Cohen (1988), la magnitude de cette différence est grande ($d = 8,6$). De la même façon, pour les stimuli scientifiques, le taux de réussite moyen des novices est de 0,37/20 et celui des experts est de 19,80/20. Pour ce type de stimuli, la différence entre ces deux groupes est également significative ($t(27) = 60,88$, $p < 0,001$) et la taille de l'effet de cette différence est très grande ($d = 46,86$). Pour les stimuli contrôle, le taux de réussite moyen des novices et des experts est comparable. Les novices ont un taux de réussite moyen de 19,74/20 et celui des experts est de 19,80/20. La différence entre les deux groupes, pour ce type de stimuli, n'est pas significative ($t(27) = 0,37$, $p = 0,718$). La taille de l'effet est négligeable ($d = 0,14$).

Le tableau 4.2 présente les temps de réaction des participants novices et experts pour les trois types de stimuli. Le temps de réaction correspond au temps entre le moment où le stimulus est présenté et le moment où le participant fournit sa réponse en appuyant sur le bouton de la boîte de réponse. Plus le temps de réaction est court, plus la réponse a été fournie rapidement et, inversement, plus le temps de réaction est long, plus le participant a mis du temps à répondre. Pour tous les types de stimuli, on constate que les experts ont répondu en moyenne plus rapidement que les novices. Pour les stimuli naïfs, le temps de réaction moyen des novices est de 2,545 s et le temps de réaction moyen des experts est de 2,288 s. Pour ce type de stimuli, la différence entre les deux groupes est significative ($t(561,984) = 6,850$, $p < 0,001$) et la magnitude de cette différence est moyenne ($d = 0,76$). Pour les stimuli scientifiques, le temps de réaction moyen des novices est de 2,473 s, alors que celui des experts est de 2,116 s. La différence entre novices et experts pour les stimuli scientifiques est

également significative ($t(564,818) = 11,960$, $p < 0,001$) et la taille de l'effet de la différence est grande ($d = 1,33$). Finalement, pour les stimuli contrôle, le temps de réaction moyen des novices est de 2,539 s et celui des experts est de 2,243 s. Or, contrairement aux résultats obtenus pour le taux de réussite, la différence entre les deux groupes pour ce type de stimuli est significative ($t(539,717) = 8,234$, $p < 0,001$) et la taille de l'effet est grande ($d = 0,86$).

Tableau 4.1 Taux de réussite des participants pour les trois types de stimuli présentés

Stimuli	Novices (n=19)			Experts (n=10)			Comparaison		
	Min (sur 20)	M (sur 20)	Écart-type (sur 20)	Max (sur 20)	Min (sur 20)	M (sur 20)	Écart-type (sur 20)	Max (sur 20)	Test-t (deux éch.)
Naïfs	0,00	0,74	0,81	2,00	13,00	18,80	2,10	20,00	t = 33,55, p < 0,001
Scientifiques	0,00	0,37	0,96	4,00	19,00	19,80	0,42	20,00	t = 60,88, p < 0,001
Contrôle	19,00	19,74	0,45	20,00	19,00	19,80	0,42	20,00	t = 0,37, p = 0,718

$t = 33,55, p < 0,001$
 $t = 60,88, p < 0,001$
 $t = 0,37, p = 0,718$

Tableau 4.2 Temps de réaction des participants pour les trois types de stimuli présentés

Stimuli	Novices (n=19)			Experts (n=10)			Comparaison		
	Min (s)	M (s)	Écart-type (s)	Max (s)	Min (s)	M (s)	Écart-type (s)	Max (s)	Test-t (deux éch.)
Naïfs	1,782	2,545	0,559	5,125	1,746	2,288	0,338	3,463	t = 6,850, p < 0,001
Scientifiques	1,816	2,473	0,447	4,513	1,586	2,116	0,268	4,047	t = 11,960, p < 0,001
Contrôle	1,744	2,539	0,510	5,130	1,742	2,243	0,345	4,471	t = 8,234, p < 0,001

$t = 6,850, p < 0,001$
 $t = 11,960, p < 0,001$
 $t = 8,234, p < 0,001$

4.2 Résultats neurologiques

Le tableau 4.3 présente les régions qui sont significativement plus activées chez les experts et les novices pour chacun des types de stimuli présentés et précise les coordonnées cérébrales de ces régions ($p < 0,0005$, seuil non corrigé, minimum 8 voxels, test t à deux échantillons indépendants, analyse à effets aléatoires). Ce tableau indique également à quelle image de la figure 4.1 correspond chacune des régions qui sont significativement plus activées. On y précise aussi la valeur de k (nombre de voxels) et de t (valeur du test de Student) pour chaque région.

Pour les stimuli naïfs, les experts présentent des activations plus importantes que les novices (experts > novices) dans les régions du cortex préfrontal dorsolatéral/antérieur gauche (BA 46/10) et du cortex préfrontal ventrolatéral droit (BA 47). Cependant, aucune région cérébrale n'est plus activée chez les experts que chez les novices lors de la présentation des stimuli scientifiques et contrôle. Les novices présentent des activations cérébrales plus importantes que les experts (novices > experts) pour les stimuli scientifiques. En effet, durant la présentation de ce type de stimuli, les novices activent davantage la région de l'aire motrice supplémentaire (BA 6). Aucune région cérébrale n'est significativement plus activée chez les novices par rapport aux experts pour les stimuli naïfs et contrôle.

La figure 4.1 permet de visualiser les régions cérébrales présentées dans le tableau 4.3. Les numéros attribués à certaines images de la figure correspondent aux numéros des images indiqués dans le tableau 4.3. On constate ainsi que deux régions sont significativement plus activées chez les participants experts (experts > novices) pour les stimuli naïfs, c'est-à-dire pour les stimuli qui sont en accord avec la fausse croyance selon laquelle une balle plus lourde tombe plus rapidement et touche le sol avant une balle plus légère. Ces deux régions, le cortex préfrontal

dorsolatéral/antérieur (BA 46/10) et le cortex préfrontal ventrolatéral (BA 47), font partie du lobe frontal, et plus précisément, du cortex préfrontal. On constate en observant la figure que l'activation du cortex préfrontal ventrolatéral est latéralisée à droite (image 1), alors que l'activation du cortex préfrontal dorsolatéral/antérieur se situe à gauche (image 2). Chez les novices (contraste novices > experts), la région de l'aire motrice supplémentaire (BA 6) est plus activée lors de l'évaluation des stimuli scientifiques, c'est-à-dire pour les stimuli qui correspondent à la conception scientifique et qui ne sont donc pas en accord avec la fausse conception à l'étude. Cette région cérébrale fait partie du cortex frontal supérieur et l'activation qui lui est associée est latéralisée dans l'hémisphère gauche (image 3).

Tableau 4.3 Régions cérébrales significativement plus activées chez les experts et chez les novices pour les différents types de stimuli présentés.

Régions cérébrales	Figure 4.1	x/y/z	k	t
Experts > Novices				
Stimuli naïfs				
Cortex préfrontal dorsolatéral gauche (BA 46)/Cortex préfrontal antérieur gauche (BA 10)	Image 1	-27/48/0	8	4,42
Cortex préfrontal ventrolatéral droit (BA 47)	Image 2	42/24/-9	20	4,92
Stimuli scientifiques				
Aucune région significativement plus activée				
Stimuli contrôle				
Aucune région significativement plus activée				
Stimuli naïfs et scientifiques combinés				
Cortex préfrontal ventrolatéral droit (BA 47)	—	42/21/-9	13	4,65
Novices > Experts				
Stimuli naïfs				
Aucune région significativement plus activée				
Stimuli scientifiques				
Aire motrice supplémentaire gauche (BA 6)	Image 3	-12/21/54	10	4,45
Stimuli contrôle				
Aucune région significativement plus activée				
Stimuli naïfs et scientifiques combinés				
Aucune région significativement plus activée				

Note : $p < 0,0005$, non corrigé, minimum 8 voxels, analyse à effets aléatoires, coordonnées dans l'espace MNI de SPM8.

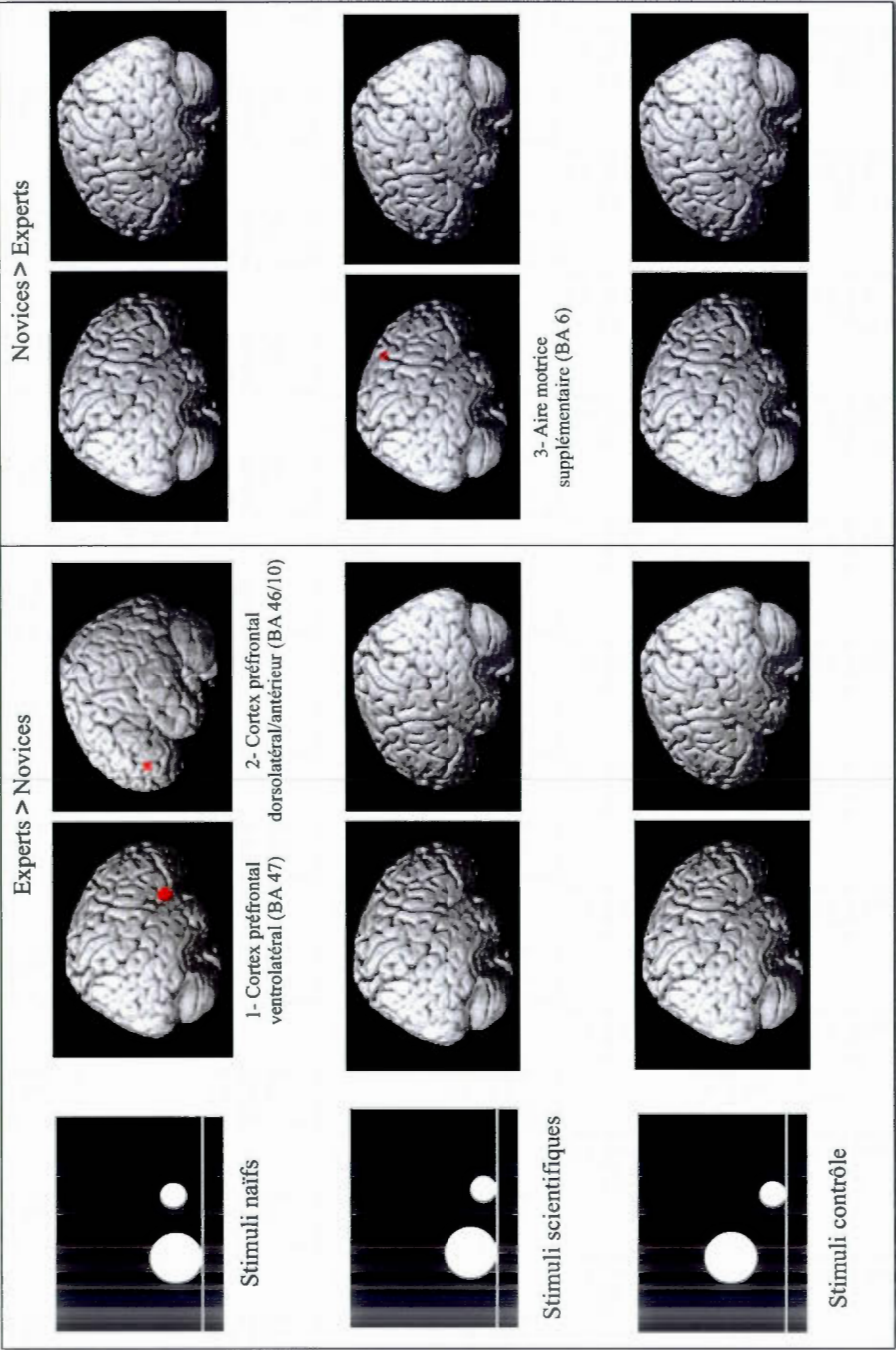


Figure 4.1 Régions cérébrales significativement plus activées chez les experts et les novices pour les trois types de stimuli présentés : contrôle, scientifiques et naïfs ($p < 0,0005$, non corrigé, minimum 8 voxels, analyse à effets aléatoires).

Le tableau 4.4 et la figure 4.2 présentent les régions cérébrales qui sont significativement plus activées chez les experts et les novices dans une condition par rapport à une autre ($p < 0,001$, seuil non corrigé, minimum 5 voxels, analyse à effets aléatoires, coordonnées dans l'espace MNI de SPM8).

Dans l'ensemble, il est possible de constater que, tant chez les experts que chez les novices, de nombreuses régions sont plus activées lorsque des stimuli naïfs sont présentés par rapport aux stimuli scientifiques (stimuli naïfs > stimuli scientifiques). Chez les experts, les régions cérébrales qui sont plus activées pour ce contraste sont : une région située à la frontière du cortex prémoteur droit et de l'aire motrice supplémentaire droite (BA 6), le lobule pariétal supérieur droit (BA 7), le gyrus occipital supérieur droit (BA 19), le gyrus lingual bilatéral (BA 18/19), l'aire motrice supplémentaire gauche (BA 6), le cortex prémoteur gauche (BA 6) ainsi que le gyrus frontal médian droit (BA 6/8). Pour le même contraste (stimuli naïfs > stimuli scientifiques), les novices présentent des activations dans le gyrus postcentral gauche (BA2), les cortex préfrontaux dorsolatéral (BA 9/46) et ventrolatéral (BA 44/45) droits, le gyrus précentral gauche (BA 4/6), l'insula antérieure gauche, l'insula antérieure droite, le gyrus temporal milieu gauche (BA 21/37), l'aire motrice supplémentaire gauche (BA 6), le cortex cingulaire antérieur gauche (BA 24) ainsi que dans une région située au croisement du lobule pariétal supérieur droit et du précunéus droit (BA 7).

On constate par ailleurs qu'aucune région cérébrale n'est significativement plus activée chez les experts pour le contraste inverse, c'est-à-dire lors de la présentation de stimuli scientifiques par rapport aux stimuli naïfs (stimuli scientifiques > stimuli naïfs). Chez les novices, les régions du cortex cingulaire antérieur droit (BA 32) et du gyrus temporal milieu gauche (BA 38) sont significativement plus activées pour ce

même contraste.

Tant chez les experts que chez les novices, des régions sont plus fortement activées pour le contraste stimuli naïfs > stimuli contrôle. Chez les experts, ces régions sont le cortex prémoteur droit (BA 6) ainsi que les lobules pariétaux inférieurs droit et gauche (BA 40). Chez les novices, il s'agit du gyrus postcentral gauche (BA 2), de l'insula antérieure gauche ainsi que d'une région touchant à la fois à l'insula postérieure gauche ainsi qu'à l'opercule rolandique gauche. Finalement, aucune différence significative d'activation n'est observée pour le contraste stimuli scientifiques > stimuli contrôle, et ce, à la fois chez les experts et les novices.

Tableau 4.4 Régions cérébrales significativement plus activées chez les experts et les novices pour une condition par rapport à une autre.

Régions cérébrales	Figure 4.2	x/y/z	k	t
Experts				
Stimuli naïfs > stimuli scientifiques	Image 1			
Cortex prémoteur droit/Aire motrice supplémentaire droite (BA 6)	a *	18/12/60	130	7,74
Lobule pariétal supérieur droit (BA 7)	b *	30/-51/54	55	6,57
Gyrus occipital supérieur droit (BA 19)	c	30/-75/33	7	6,22
Gyrus lingual gauche (BA 18/19)	d	-18/-81/-6	5	5,75
Aire motrice supplémentaire gauche (BA 6)	e	0/21/63	20	5,70
Gyrus lingual droit (BA 18)	f *	9/-84/-6	37	5,46
Cortex prémoteur gauche (BA 6)	g	-24/6/51	8	5,17
Gyrus frontal supérieur médian droit (BA 6/8)	h	3/33/48	19	5,03
Stimuli scientifiques > stimuli naïfs				
Aucune région significativement plus activée				
Stimuli naïfs > stimuli contrôle	Image 2			
Cortex prémoteur droit (BA 6)	a *	33/9/60	36	8,14

Note : $p < 0,001$, non corrigé, minimum 5 voxels, analyse à effets aléatoires, coordonnées dans l'espace MNI de SPM8.

* : régions cérébrales qui demeurent significativement plus activées au seuil $p < 0.0005$, min. 8 voxels.

Tableau 4.4 (suite) Régions cérébrales significativement plus activées chez les experts et les novices pour une condition par rapport à une autre.

Cortex prémoteur droit (BA 6)	b*	39/12/33	46	6,92
Lobule pariétal inférieur droit (BA 40)	c	39/-45/48	16	5,66
Lobule pariétal inférieur gauche (BA 40)	d	-39/-51/45	6	4,90
Stimuli scientifiques > stimuli contrôle				
Aucune région significativement plus activée				
Novices				
Stimuli naïfs > stimuli scientifiques	Image 3			
Gyrus postcentral gauche (BA 2)	a*	-63/-18/36	157	6,77
Cortex préfrontal dorsolatéral droit (BA 9/46) et cortex ventrolatéral droit (BA 44/45)	b*	51/24/27	92	5,61
Gyrus précentral gauche (BA 4)	c	-36/-15/60	10	5,02
Insula antérieure gauche	d	-33/15/9	5	4,79
Gyrus précentral gauche (BA 6)	e	-63/6/9	9	4,63
Gyrus précentral gauche (BA 6)	f	-60/9/27	12	4,53
Insula antérieure droite	g	33/27/-3	13	4,32
Gyrus temporal milieu gauche (BA 21/37)	h	-54/-60/3	9	4,21
Insula antérieure gauche	i	-24/18/-9	7	4,20

Note : $p < 0,001$, non corrigé, minimum 5 voxels, analyse à effets aléatoires, coordonnées dans l'espace MNI de SPM8.

* : régions cérébrales qui demeurent significativement plus activées au seuil $p < 0.0005$, min. 8 voxels.

Tableau 4.4 (suite) Régions cérébrales significativement plus activées chez les experts et les novices pour une condition par rapport à une autre.

Aire motrice supplémentaire gauche (BA 6)	j	-9/0/54	5	4,10
Cortex cingulaire antérieur gauche (BA 24)	k	-6/3/33	9	4,06
Lobule pariétal supérieur droit/Précunéus droit (BA 7)	l	12/-57/45	5	3,98
Stimuli scientifiques > stimuli naïfs	Image 4			
Cortex cingulaire antérieur droit (BA 32)	a *	21/48/6	26	5,09
Gyrus temporal milieu gauche (BA 38)	b	-42/15/-36	6	4,98
Stimuli naïfs > stimuli contrôle	Image 5			
Gyrus Postcentral gauche (BA 2)	a *	-51/-21/30 *	38	5,37
Gyrus Postcentral gauche (BA 2)	b	-54/-21/51	17	4,21
Insula antérieure gauche	c	-36/15/-3	12	4,15
Insula postérieure gauche/Opércule rolandique gauche	d	-39/-6/18	5	3,88
Stimuli scientifiques > stimuli contrôle				
Aucune région significativement plus activée				

Note : $p < 0,001$, non corrigé, minimum 5 voxels, analyse à effets aléatoires, coordonnées dans l'espace MNI de SPM8.

* : régions cérébrales qui demeurent significativement plus activées au seuil $p < 0.0005$, min. 8 voxels.

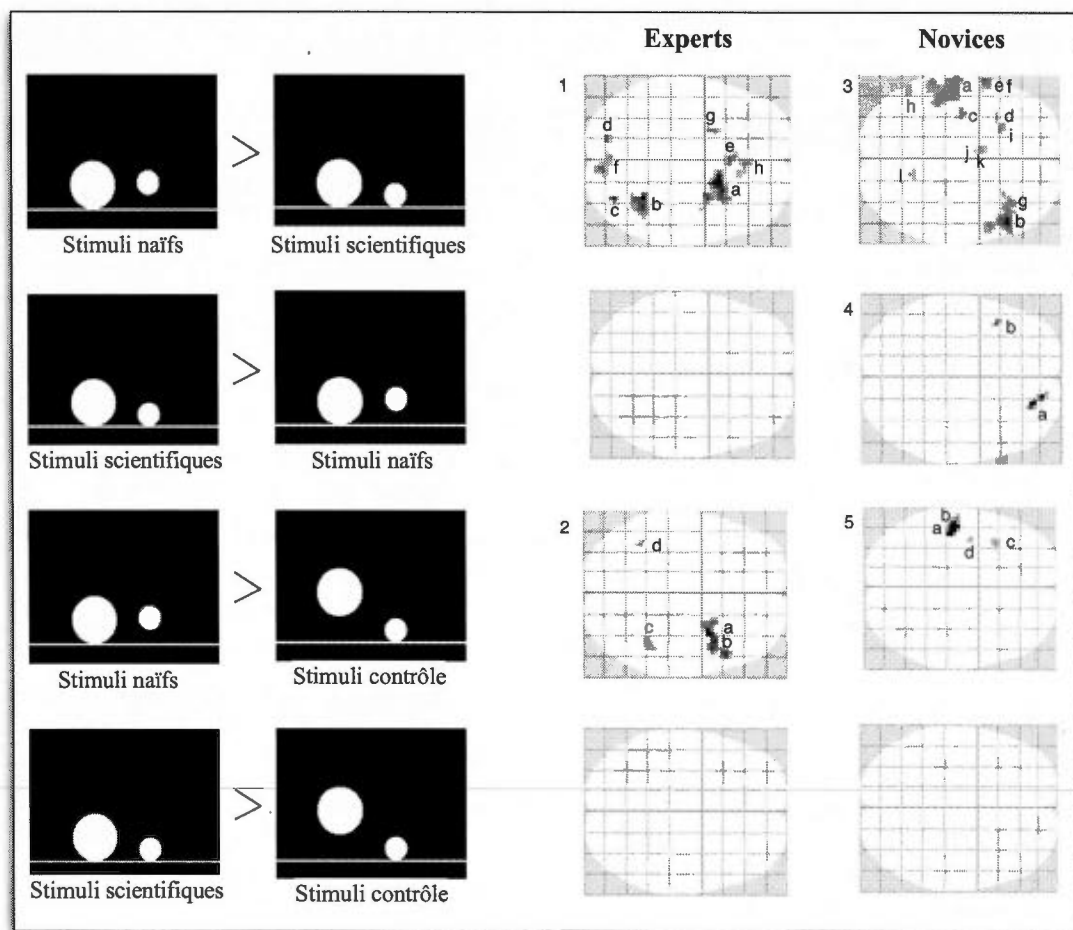


Figure 4.2 Régions significativement plus activées chez les experts et les novices pour une condition par rapport à une autre ($p < 0,001$, non corrigé, minimum 5 voxels, analyse à effets aléatoires).

CHAPITRE V

INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

La question à laquelle tente de répondre la présente recherche est la suivante : est-ce que les experts en physique mécanique possèdent toujours de fausses conceptions qu'ils doivent inhiber?

L'hypothèse générale de cette recherche était que les conceptions initiales en physique mécanique ne disparaissent pas lors d'un changement conceptuel. Il faudrait donc qu'un individu apprenne à inhiber ses préconceptions, c'est-à-dire à mobiliser les régions du CCA et du cortex préfrontal, afin de parvenir à réaliser un changement conceptuel. L'expertise en science se caractériserait ainsi par le développement de la capacité à inhiber et un expert activerait, davantage qu'un novice, des régions cérébrales associées à l'inhibition lors de l'évaluation d'un stimulus impliquant une conception fréquente.

Dans cette section, les résultats qui viennent d'être présentés sont donc interprétés afin de répondre à la question de recherche et de vérifier si les hypothèses émises se sont avérées exactes.

Dans un premier temps, les principales différences d'activation cérébrale observées entre le groupe des experts et celui des novices sont présentées et interprétées. Puis, s'ensuit une discussion sur le lien entre l'expertise en mécanique et l'inhibition en détaillant le rôle des principales régions cérébrales impliquées dans le processus d'inhibition. Finalement, les retombées possibles des résultats sont discutées en

regard de deux aspects précis : le changement conceptuel ainsi que l'apprentissage et l'enseignement des sciences.

5.1 Différences générales observées entre les experts et les novices

Plusieurs différences peuvent être observées entre le groupe des experts et celui des novices, tant au niveau des données comportementales (différences au niveau du temps de réaction et du taux de réussite) que neurologiques (différences au niveau des activations cérébrales).

5.1.1 Différences au niveau des données comportementales

Sur le plan comportemental, les participants experts se distinguent des novices quant aux taux de réussite obtenus pour les différents types de stimuli. En effet, les résultats montrent qu'il existe une différence significative entre les deux groupes pour les stimuli naïfs et scientifiques, les participants novices présentant un taux de réussite beaucoup plus faible que celui des experts. Ces différences confirment que le groupe des novices était bel et bien composé de participants novices (dont les conceptions étaient en accord avec la conception fréquente à l'étude), que le groupe des experts était bel et bien composé de participants experts (dont les conceptions n'étaient pas en accord avec la conception fréquente à l'étude) et donc que les deux groupes se distinguaient relativement à la nature de leurs conceptions. Pour les stimuli contrôle (qui n'exigeaient pas de surmonter une réponse spontanée pour répondre correctement), il n'y avait aucune différence significative, les deux groupes présentant des taux de réussite très élevés. Cela indique qu'une compréhension suffisante de la tâche a été atteinte chez les deux groupes.

Concernant les temps de réaction, il existe également plusieurs différences notables entre les deux groupes. Pour tous les types de stimuli, les experts ont répondu significativement plus rapidement que les novices, même lorsqu'ils évaluaient un stimulus naïf et qu'ils répondaient scientifiquement (ce qui, selon l'hypothèse de départ, devrait nécessiter de leur part un travail d'inhibition). Pourtant, plusieurs recherches établissent un lien entre le temps de réaction et l'inhibition en postulant que le fait de restreindre le temps disponible pour répondre à une question diminue la capacité à inhiber (De Neys, 2006; Evans & Curtis-Holmes, 2005; Kelemen & Rosset, 2009 ; Kelemen et al., 2012) ou encore qu'un temps de réaction plus élevé est le reflet d'un raisonnement plus complexe, d'un effort cérébral particulier et donc un bon indicateur de l'inhibition (Shtulman & Valcarcel, 2012). En effet, inhiber constituerait une étape de traitement supplémentaire à réaliser avant de pouvoir fournir une réponse. Le fait que les participants experts répondent plus rapidement semble donc, de prime abord, contradictoire avec l'hypothèse selon laquelle l'expertise en mécanique serait liée au développement de la capacité à inhiber. Cependant, il est possible que les experts, en raison de leur formation scientifique avancée, parviennent à analyser plus rapidement les stimuli qui leur sont présentés et que, malgré leur besoin d'effectuer une étape de plus que les novices (celle d'inhiber), leur temps de réaction global demeure plus court que ces derniers. Il est aussi possible que cette étape supplémentaire d'inhibition soit relativement rapide, ce qui expliquerait pourquoi le temps de réaction total des experts demeure tout de même inférieur à celui des novices.

5.1.2 Différences au niveau des données neurologiques

Sur le plan cérébral, on constate à la figure 4.1 que les participants experts se différencient des novices au niveau de l'intensité de certaines de leurs activations cérébrales, pour les différents types de stimuli. Ces différences significatives

d'activation laissent entendre que les experts et les novices réalisent un travail cérébral distinct et qu'ils mobilisent différemment (avec plus ou moins d'intensité) certaines régions cérébrales, et donc certaines fonctions cognitives, pour accomplir la tâche demandée.

Pour les circuits scientifiques, on observe que les novices présentent des activations plus prononcées que les experts dans la région de l'aire motrice supplémentaire (AMS) gauche. Cette région (indistinctement de sa latéralisation) est généralement associée à la planification temporelle (Tanji & Shima, 1994), à l'anticipation et à l'initiation des mouvements (Ward, 2010). Elle aurait un rôle important à jouer dans la réalisation d'une tâche motrice impliquant la récupération d'informations motrices ayant été préalablement mémorisées (Tanji, 1994). Une recherche démontre également qu'il existerait une asymétrie hémisphérique dans la connectivité de cette région cérébrale. La région de l'AMS située dans l'hémisphère gauche jouerait en effet un rôle dominant (c'est-à-dire plus important que la région de l'hémisphère droit) dans le contrôle des mouvements des mains chez les individus droitiers (Rogers, Carew, & Meyerand, 2004). Dans le cadre de notre étude, l'action à réaliser consistait à peser sur un bouton de la boîte de réponse pour évaluer les stimuli qui étaient présentés. Une activation plus forte de l'AMS gauche chez les novices comparativement aux experts pourrait donc signifier que ceux-ci ont besoin de solliciter davantage cette région cérébrale en lien avec la préparation à l'action, lorsqu'ils évaluent des stimuli scientifiques. Étant donné que les novices sont moins familiers que les experts avec l'évaluation de stimuli en mécanique, il est possible que la planification de leur réponse motrice exige un effort particulier. D'ailleurs, le fait que les experts ne présentent aucune activation plus prononcée pour ces types de stimuli et que leur activité cérébrale dans la région de l'AMS soit assurément moindre que celle des novices suggère que les participants experts ont une plus grande facilité à planifier et à initier leur réponse motrice et qu'ils ont peut-être automatisé

davantage l'action motrice à réaliser. Cela peut être dû au fait que les participants experts ont plus de facilité que les novices, au niveau cognitif, à évaluer les stimuli scientifiques et à sélectionner la réponse appropriée et cette facilité se refléterait sur leur réponse motrice par une moins grande activation de l'AMS gauche.

D'ailleurs, la seule activation significativement plus élevée pour les experts comparativement aux novices se manifeste lors de l'évaluation des stimuli naïfs. En effet, pour ce type de stimuli, on observe non seulement que les novices ne présentent aucune activation plus marquée que les experts, mais surtout que chez les experts, deux régions cérébrales sont davantage mobilisées : le CPDL gauche et le cortex préfrontal ventrolatéral (CPVL) droit. Étant donné que cette comparaison (Experts > Novices pour les stimuli naïfs) est celle qui permet de répondre le mieux et le plus directement à la question de recherche, les activations cérébrales qui lui sont associées seront abordées plus en détail dans la section 4.2.2.

Dans l'ensemble, les comparaisons réalisées entre les deux groupes révèlent que la nature du travail cérébral des novices et des experts n'est pas la même lors de l'évaluation des trois types de stimuli. Ces résultats appuient l'idée selon laquelle les experts et les novices présentent un fonctionnement cérébral distinct lorsqu'ils analysent et répondent aux différentes situations en mécanique qui leur sont présentées. Cela nous mène donc à poser un premier constat : **les différences cérébrales entre novices et experts indiquent que ces deux groupes de participants ne réalisent pas le même travail cérébral pour évaluer les différents types de stimuli. Nous postulons que le facteur à l'origine de cette différence cérébrale réside dans le niveau de compréhension scientifique des deux groupes** (les novices n'ayant pas réalisé de changement conceptuel en mécanique et les experts étant présumés comme ayant déjà réalisé ce changement conceptuel).

5.1.3 Discussion des autres hypothèses envisageables

Bien que l'âge des sujets des deux groupes ainsi que leur sexe et leur préférence manuelle soient des facteurs ayant été contrôlés (les participants sont tous des hommes droitiers âgés de 18 à 30 ans et l'âge moyen des deux groupes est équivalent), il n'est pas possible d'affirmer hors de tout doute que le niveau de compréhension scientifique est l'unique cause de ces différences cérébrales. Pour être en mesure de l'affirmer avec une plus grande certitude, il aurait fallu comparer directement l'activité cérébrale *avant* avec l'activité cérébrale *après* un apprentissage en physique mécanique. D'autres causes pourraient donc être envisagées pour tenter d'expliquer l'origine des différences cérébrales que nous avons enregistrées.

D'abord, il existe un biais lié à la méthode de recrutement sur une base volontaire. En effet, il est possible que les caractéristiques des personnes volontaires qui se sont proposées volontairement pour participer à l'étude soient différentes de celles des personnes qui ont décidé de ne pas y participer. Le fait que les volontaires possèdent des caractéristiques distinctes aurait donc pu influencer les résultats obtenus. Toutefois, comme la technique du recrutement volontaire a été utilisée à la fois pour les novices et pour les experts, il semble peu probable que cela soit à l'origine de différences entre les deux groupes.

Ensuite, étant donné que le recrutement des experts et des novices a eu lieu à deux moments différents assez éloignés l'un de l'autre (voir section 3.1.3), il pourrait exister un biais lié à un effet de cohorte (chacune des cohortes détenant des particularités associées au fait de vivre un certain nombre d'événements communs durant une même période de temps). Il est donc possible que la cohorte à laquelle appartenaient les participants experts soit sensiblement différente de celle à laquelle appartenaient les participants novices. Si tel est le cas, les différences cérébrales

observées pourraient alors être attribuables en partie à un autre facteur que le seul niveau de compréhension scientifique.

Une autre hypothèse envisageable pourrait être liée au fait que, contrairement aux experts, plusieurs des participants novices étaient des étudiants étrangers ayant complété tout leur parcours scolaire antérieur à l'extérieur du Québec (5 étudiants sur 19 avaient réalisé leurs études préuniversitaires en France ou aux États-Unis et avaient décidé de réaliser un baccalauréat dans une université québécoise). Bien que le profil de ces participants correspondait au profil recherché des novices au niveau de leur formation scientifique, il est tout de même possible que des facteurs de nature culturelle aient pu faire en sorte que le groupe des novices se distingue légèrement de celui des experts. Il n'est donc pas possible d'affirmer avec certitude que l'unique différence entre les deux groupes résidait dans leur niveau de compréhension scientifique. Cependant, puisque les deux groupes de participants étaient tous deux composés d'étudiants universitaires du même âge ayant terminé leurs études secondaires et collégiales et possédant donc de bonnes capacités académiques, il y a peu de chance que les différences cérébrales observées soient uniquement associées à des différences de nature culturelle.

Finalement, une autre hypothèse envisageable serait que les étudiants qui choisissent de réaliser des études universitaires en physique sont intrinsèquement différents des étudiants qui décident de poursuivre des études universitaires en sciences humaines au niveau de leur curiosité, de leurs intérêts et même de leur manière de penser (style cognitif). En ce sens, une étude de Billington, Baron-Cohen et Wheelwright (2007) a d'ailleurs démontré que des individus possédant un style cognitif systématique (caractérisé par une bonne capacité d'analyser les règles qui sous-tendent un système en vue de prédire son comportement) auraient davantage tendance à vouloir faire des sciences, que des individus possédant un style cognitif plus empathique (caractérisé

par une bonne capacité à interagir socialement). Il est également possible que les deux groupes se distinguent au niveau de leur quotient intellectuel ou encore de leur niveau général de performance ou de réussite scolaire. Le critère de sélection se rapportant à la moyenne universitaire des participants permettait cependant de contrôler en partie cette variable.

À la lumière de l'évaluation de ces possibilités, **nous croyons que l'idée selon laquelle les différences d'activations cérébrales seraient principalement attribuables au niveau de compréhension scientifique demeure plausible.**

5.2 Expertise en mécanique et inhibition

L'hypothèse de recherche principale formulée à la fin du cadre théorique postulait que les participants experts auraient besoin d'inhiber leur conception fréquente « plus une balle est lourde, plus elle tombe rapidement » afin de répondre de façon scientifique.

Plus précisément, nous avons prédit que les experts présenteraient des activations cérébrales significativement plus fortes dans les régions généralement associées à l'inhibition telles que le cortex cingulaire antérieur (CCA) ainsi que le cortex préfrontal (dorsolatéral et ventrolatéral), lors de l'évaluation de stimuli naïfs. Selon le modèle de Botvinick et ses collaborateurs (2001, 2007), ces régions détiennent des rôles distincts dans le processus de contrôle cognitif. Le CCA joue un rôle au niveau de la détection d'un conflit dans le traitement de l'information et il est responsable d'envoyer un signal au cortex préfrontal afin de l'engager dans la résolution de ce conflit. Le CCA et le cortex préfrontal sont donc spécialisés pour accomplir des tâches spécifiques, mais il existe un pont entre la détection du conflit et la mise en place du contrôle cognitif lui-même.

Les résultats obtenus confirment en partie l'hypothèse formulée. En effet, tel qu'attendu, lorsqu'on observe les régions qui sont significativement plus activées chez les experts que chez les novices (Experts > Novices) pour les stimuli naïfs, on constate que deux régions en lien avec l'inhibition ressortent : le CPDL/antérieur gauche et le CPVL. Les sections suivantes détailleront donc le rôle de chacune de ces deux régions et fourniront une interprétation possible de ces activations dans le contexte de cette recherche.

5.2.1 Le cortex préfrontal dorsolatéral

De façon générale, le CPDL est associée au contrôle cognitif, à l'attention ainsi qu'à la mémoire de travail (Miller & Cohen, 2001). De façon plus spécifique, il ressort des écrits de recherche que cette région serait également responsable de maintenir et de garder active l'information pertinente dans la mémoire de travail (Curtis, 2003), de mettre en relation et d'intégrer plusieurs éléments d'information pouvant provenir de différentes régions du cerveau (Blumenfeld, 2006, 2011) ainsi que de comparer plusieurs éléments d'information ou représentations et de sélectionner une réponse appropriée parmi plusieurs représentations actives dans la mémoire de travail (Rowe et al., 2000). Certaines recherches associent encore plus précisément le CPDL gauche au maintien de l'information nécessaire à la résolution d'une tâche dans la mémoire de travail ainsi qu'à un processus d'évaluation et de comparaison d'informations provenant notamment des régions sensorielles du cerveau (MacDonald, 2000; Heekeren, 2006). Le CPDL (gauche et droit) serait donc en quelque sorte un centre intégrateur permettant l'organisation des informations dans la mémoire de travail ainsi que la comparaison et la sélection de l'information ou d'une réponse en fonction du contexte.

Si l'on émet l'hypothèse que les préconceptions des experts n'ont jamais disparu de leur cerveau, l'activation de cette région cérébrale n'est pas surprenante, car il devient alors nécessaire pour ces derniers de maintenir en mémoire leurs deux représentations coexistantes (naïve et scientifique) et de comparer ces représentations pour ensuite sélectionner la réponse appropriée.

5.2.2 Le cortex préfrontal ventrolatéral

Le CPVL est également une région cérébrale liée au contrôle cognitif. Cette région serait plus spécifiquement responsable de la réponse d'inhibition (*response inhibition*) permettant de contrer ou de stopper une conduite ou une décision. Une recension des écrits (Aron, Robbins & Poldrack, 2004) a entre autres permis de découvrir que plus le CPVL droit était endommagé chez un individu, plus sa capacité d'inhibition était réduite. Selon ces chercheurs : « Recent advances [...] show that a common component – inhibition – is specifically implemented by the right inferior frontal cortex [cette région étant l'équivalent du CPVL droit] » (p. 175). Une autre étude (Tsujii & Watanabe, 2010) a également démontré que réduire le temps dont dispose un individu pour répondre à une question impliquant une conception fréquente a pour effet de diminuer l'activité du CPVL droit et d'entraîner une réponse erronée s'appuyant sur une conception naïve, heuristique, plutôt que sur une conception logique ou scientifique. Une récente recherche s'intéressant aux conduites sociales a aussi permis de montrer que cette région cérébrale était plus activée lorsque des individus refrénaient leur envie d'utiliser un mot considéré comme étant socialement tabou (Severens, Kühn, Hartsuiker, & Brass, 2012). D'autres chercheurs (Chikazoe, Konishi, Asari, Jimura, & Miyashita, 2007) ont même signalé que cette implication active du CPVL droit dans la réponse inhibitrice avait lieu, peu importe la méthode de réponse employée (visuelle ou manuelle).

Cela revient à dire que le CPVL serait responsable de l'action même d'inhiber lors de la résolution d'une situation impliquant une conception fréquente : « The right inferior frontal gyrus [ou CPVL] may play a role in blocking the belief-based heuristic system for solving incongruent reasoning trials » (Tsujii et al., 2011). L'activation de cette région dans le cadre de notre étude est en adéquation avec l'hypothèse avancée : les experts ont besoin de mettre en place un mécanisme d'inhibition afin de bloquer activement leur tendance à vouloir répondre selon leur représentation naïve plutôt que selon leur représentation scientifique.

L'activation significativement plus importante de ces deux régions préfrontales (dorsolatérale et ventrolatérale) chez les experts comparativement aux novices serait donc le signe que les experts doivent effectivement fournir un effort supplémentaire ou réaliser une étape additionnelle dans le traitement de l'information et faire preuve d'inhibition pour répondre à la tâche. Cette nécessité de solliciter des régions cérébrales associées à l'inhibition laisse entendre que les conceptions fréquentes qu'entretenaient les experts en mécanique n'ont pas disparu de leur cerveau, qu'elles n'ont pas été complètement modifiées ou restructurées au cours de leur apprentissage des sciences, mais qu'elles sont plutôt demeurées présentes dans leur cerveau et qu'il est donc nécessaire pour les experts de les inhiber afin d'être en mesure de sélectionner et de fournir une réponse scientifiquement correcte.

Ces deux régions cérébrales du cortex préfrontal sont d'ailleurs identifiées (sans nécessairement faire de distinction au niveau de leur latéralisation) dans plusieurs recherches portant sur l'inhibition (Buchsbaum et al., 2005; Lie et al., 2006; Menon et al., 2001; Monchi et al., 2001). Au niveau de la didactique des sciences, la recherche de Masson (2012) en électricité, sur laquelle prend appui la méthodologie de la présente recherche, a également obtenu des patrons d'activations cérébrales

similaires. En effet, dans le cadre de cette recherche, le contraste Experts > Novices pour les stimuli naïfs était entre autres associé à des activations significativement plus prononcées pour les régions préfrontales dorsolatérale et ventrolatérale. Ces résultats avaient d'ailleurs amené l'auteur à postuler que l'inhibition joue un rôle central dans l'expertise en électricité. Il semble donc que l'intervention des régions préfrontales dorsolatérale et ventrolatérale dans le processus d'inhibition fasse l'objet d'un certain consensus au sein de la communauté scientifique. Cependant, pour plusieurs de ces recherches, dont celle de Masson (2012), cet engagement des régions préfrontales est aussi combiné à une activation significativement plus importante du CCA chez les participants experts, pour l'évaluation des stimuli naïfs. Il semble donc surprenant, à première vue, que tel ne soit pas le cas dans le cadre de la présente recherche. La section suivante tente donc de mieux comprendre et d'expliquer cette particularité.

5.2.3 Le cas particulier du cortex cingulaire antérieur

Tel que mentionné précédemment, le CCA jouerait un rôle indirect dans le processus d'inhibition (Botvinick et al., 2001, 2007). En effet, cette région cérébrale ne serait pas associée directement à l'action d'inhiber. Elle serait plutôt responsable d'une étape antérieure à la réponse inhibitrice : celle de la détection d'un conflit entre deux représentations concurrentes, mais coexistantes (Garavan, Ross, Murphy, Roche, & Stein, 2002 ; MacDonald et al., 2000).

Comme cette détection de conflit semble a priori essentielle pour que les régions préfrontales s'engagent dans la résolution du conflit en mettant en place un mécanisme d'inhibition, il paraît surprenant que le CCA ne soit pas plus activé chez les experts, alors que ces derniers mobilisent par ailleurs les régions préfrontales associées à l'inhibition lorsqu'ils évaluent des stimuli naïfs. Est-il réellement possible

de postuler que les experts font preuve d'inhibition si cette région ne ressort pas de l'analyse du contraste experts > novices pour les stimuli naïfs?

Il importe de mentionner que cette absence de différence significative entre les experts et les novices ne signifie pas que les experts n'activent pas du tout cette région. Bien entendu, il est clair que leur activation ne dépasse pas significativement celle des novices, mais cela ne veut pas dire qu'ils ne présentent aucune activation du CCA. Une explication pertinente pourrait être que les deux groupes de participants mobilisent cette région du cerveau de manière équivalente lorsqu'ils évaluent des stimuli naïfs, annulant la possibilité de voir une différence significative entre les deux groupes. L'observation du tableau 4.4 permet d'ailleurs de constater que les novices activent bel et bien leur CCA lors de l'évaluation de stimuli naïfs puisque cette région cérébrale ressort du contraste stimuli naïfs > stimuli scientifiques (voir figure 4.2, image 3k). Pour ce qui est des experts, il serait plausible de croire qu'ils activent plus faiblement que les novices leur CCA lors de l'évaluation de stimuli naïfs, car le CCA ne ressort pas du contraste stimuli naïfs > stimuli scientifiques. Cela ne veut pas dire pour autant qu'ils n'activent pas du tout cette région, mais plutôt qu'ils ne l'activent pas davantage lors de l'évaluation des stimuli naïfs. Cela pourrait s'expliquer par le fait que lorsque les experts évaluent les stimuli scientifiques, leur cerveau détecte tout de même un conflit entre les représentations naïves et scientifiques, bien qu'ils jugent les stimuli présentés comme étant corrects et qu'ils fournissent la bonne réponse. Il est donc fort possible que les experts activent leur CCA lorsqu'ils évaluent ce type de stimuli, ce qui expliquerait pourquoi cette région ne ressort pas du contraste stimuli naïfs > stimuli scientifiques. Le fait que le CCA ne ressorte pas du contraste experts > novices pour les stimuli naïfs ne semble donc pas permettre de discréditer l'hypothèse de l'inhibition chez les experts.

Il demeure tout de même difficile de comprendre pourquoi les novices mobiliseraient le CCA alors qu'ils jugent que la situation est correcte (ce qui ne devrait pas mobiliser les mécanismes liés à la détection d'un conflit) et qu'ils fournissent, en fin de compte, une réponse qui n'est pas la bonne. Comment pourrait s'expliquer une telle activation cérébrale?

L'hypothèse que nous avançons est que les participants novices vivent bel et bien une situation de conflit cognitif, même s'ils ne parviennent pas à inhiber leur conception initiale. Cette hypothèse s'appuie principalement sur les résultats d'une étude qui cherchait à vérifier si les gens fournissent des réponses erronées parce qu'ils ne réussissent pas à s'apercevoir qu'ils font une erreur (c'est-à-dire que leur réponse intuitive n'est pas la bonne) ou parce qu'ils ne sont pas capables de rejeter ou de contrer leur mauvaise réponse (De Neys, Cromheeke, & Osman, 2011). Les résultats obtenus par les chercheurs montrent que des participants à qui l'on demandait de répondre à une question à laquelle était associée une conception fréquente montraient une diminution de leur niveau de confiance (qui n'était pas nécessairement consciente) lorsqu'ils fournissaient une réponse intuitive entrant en conflit avec une réponse normative. Cela voudrait dire que, même si des individus ne réussissent pas toujours à rejeter ou inhiber leur représentation naïve pour répondre correctement, il est possible qu'ils vivent tout de même une situation de conflit et que leur cerveau détecte que leur réponse n'est pas totalement justifiée. D'ailleurs, une étude en neuroimagerie portant sur le même objet de recherche (De Neys, Vartanian, & Godel, 2008c) avait auparavant révélé que des participants activaient leur CCA à la fois lorsqu'ils fournissaient une réponse correcte et incorrecte, alors qu'ils n'activaient leur cortex préfrontal que lorsqu'ils répondaient correctement. Les résultats de ces recherches appuient donc l'idée selon laquelle le CCA pourrait être activé chez les participants novices de notre recherche : même si ceux-ci ne mobilisent aucune région en lien avec l'inhibition et donnent des réponses qui sont visiblement

mauvaises, il est fort probable que le cerveau d'une majorité d'entre eux ait tout de même détecté l'existence d'un conflit sans parvenir à le résoudre. Il semble ainsi possible de croire que le groupe des novices de notre recherche se situait à un stade légèrement plus avancé du changement conceptuel que le stade de l'absence totale de connaissances, puisque leur cerveau était en mesure de détecter leur erreur, sans toutefois être rendu au stade de pouvoir l'empêcher de se produire. Cette hypothèse fournit également une piste intéressante pour expliquer le fait que les novices aient obtenu des temps de réaction plus élevés que les experts lors de l'évaluation des stimuli naïfs. En effet, une activation du CCA chez les novices (signe que leur cerveau aurait détecté un conflit) pourrait être à l'origine d'un délai de réponse plus grand.

Sur le plan de la didactique des sciences, il est intéressant de pousser plus loin cette réflexion en se demandant pourquoi une différence significative d'activation du CCA entre les experts et les novices avait pu être observée dans la recherche en électricité de Masson (2012) et qu'aucune différence n'a pu être identifiée pas dans cette recherche en mécanique.

D'abord, malgré le respect des mêmes critères de sélection (voir sections 3.1.2 et 3.1.3), il demeure possible que les novices des deux recherches aient présenté un degré de noviciat légèrement différent et qu'ils se soient ainsi situés à des stades un peu inégaux du processus de changement conceptuel. La majorité des novices en électricité n'avait peut-être pas atteint le stade où le cerveau détecte qu'il existe un conflit entre plusieurs représentations d'un même concept. Ensuite, il est également possible que les caractéristiques propres aux deux tâches cognitives utilisées aient eu une influence sur cette différence d'activation. Dans la recherche en électricité, la tâche cognitive impliquait l'évaluation de circuits électriques et portait spécifiquement sur la conception fréquente « un seul fil est nécessaire pour allumer

une ampoule ». En comparaison, il est probable que la tâche en mécanique impliquant des balles qui tombent ait été beaucoup plus familière aux participants, d'une part, parce qu'on voit tous les jours des objets tomber, et d'autre part, car il s'agit d'une conception dont il est explicitement question à l'école et qui est souvent prise en exemple, ce qui n'est pas le cas de la conception utilisée en électricité. Ce niveau de familiarité différent pourrait expliquer pourquoi les novices en mécanique auraient tendance à solliciter davantage leur CCA que le groupe des novices en électricité : la conception abordée étant plus familière, il devient alors plus facile pour le cerveau de détecter le conflit, même s'il ne parvient pas encore à le résoudre. À l'inverse, en électricité, la conception étant moins familière, il est plus difficile pour le cerveau de détecter la présence d'un conflit. Les novices en électricité présentent donc une activation beaucoup moins grande de leur CCA. Le fait que leur activité soit moins élevée permet ainsi de percevoir une différence significative lorsqu'on compare leur patron cérébral à celui des experts pour ce type de stimuli.

À la lumière de cette réflexion, l'hypothèse la plus plausible est que les experts en mécanique font preuve d'inhibition, même s'ils ne présentent pas une activation significativement plus importante que les novices dans la région du CCA lorsqu'ils évaluent des stimuli naïfs. Il semble donc logique de penser que, comparativement aux novices, les experts doivent réaliser une étape supplémentaire au niveau du traitement et de l'analyse cérébrale des stimuli naïfs : une étape d'inhibition. Toutefois, il apparaît important d'évaluer si d'autres facteurs pourraient permettre d'expliquer les différences d'activation observées. La section suivante cherchera donc à répondre à la question suivante : les activations cérébrales préfrontales qui sont plus accentuées chez les experts sont-elles vraiment la conséquence de la mobilisation d'un mécanisme cérébral supplémentaire (l'inhibition) de la part de ces derniers?

5.2.4 Discussion des autres hypothèses envisageables

Une autre hypothèse envisageable serait que les experts n'effectuent pas forcément une étape supplémentaire d'analyse cérébrale, mais qu'ils réalisent plutôt un processus d'analyse radicalement différent des novices en utilisant, par exemple, une stratégie ou un algorithme de résolution distinct. Si tel est le cas, cela voudrait dire que les novices et les experts ne détiendraient aucune étape d'analyse commune. Cependant, si cette supposition s'avérait exacte, on devrait alors observer des régions cérébrales significativement plus activées chez les novices (rattachées à leur propre stratégie d'analyse) et d'autres régions cérébrales significativement plus activées chez les experts (correspondant à une autre stratégie d'analyse). En effet, les résultats de recherches ayant comparé différentes stratégies d'apprentissage et d'enseignement en lecture (Yoncheva et al., 2010) ainsi qu'en mathématiques (Grabner et al., 2009) indiquent que des stratégies d'analyse différentes seraient respectivement associées à des patrons d'activations cérébrales distincts. Or, dans le cadre de la présente recherche, aucune région n'est plus activée chez les participants novices comparativement aux experts lors de l'évaluation de stimuli naïfs (voir figure 4.1). Les résultats laissent donc plutôt entendre que les experts effectuent quelque chose de plus que les novices, puisqu'ils mobilisent davantage certaines régions cérébrales lors de l'évaluation de stimuli naïfs alors que les novices ne mobilisent aucune région supplémentaire pour le même type de stimuli. Il est donc possible de croire que les experts réalisent plutôt une étape d'analyse supplémentaire et, puisque les régions qu'ils sollicitent davantage sont des régions du cortex préfrontal associées au contrôle cognitif, cette étape additionnelle pourrait vraisemblablement en être une d'inhibition.

Une hypothèse alternative pourrait être que les différences d'activation observées entre les experts et les novices pour la présentation de stimuli naïfs ne sont pas dues au fait que les experts réalisent une étape de plus que les novices, mais plutôt au fait

que les réponses fournies par les deux groupes sont différentes : les experts affirment que les stimuli naïfs sont incorrects, alors que les novices les jugent corrects. Selon cette perspective, les différences observées au niveau cérébral pourraient ainsi être le reflet des différences entre les types de réponses fournies. Cependant, si ces différences d'activation étaient dues uniquement au type de réponse fournie par le participant, alors des différences cérébrales similaires auraient dû être observées lors de la présentation de stimuli scientifiques étant donné que les réponses fournies par les novices et les experts diffèrent également pour ce type de stimuli (les novices affirment que les stimuli scientifiques sont incorrects et les experts affirment qu'ils sont corrects). Or, si l'on observe la figure 4.1, on constate que tel n'est pas le cas. En effet, les régions qui sont respectivement plus activées chez les novices et les experts lorsqu'ils évaluent les stimuli scientifiques ne sont pas les mêmes que celles qui sont plus activées lorsqu'ils évaluent les stimuli naïfs. Cela laisse entendre que l'évaluation de ces deux types de stimuli ne nécessite pas la mobilisation du même mécanisme cérébral (ce qui aurait dû être le cas si les différences d'activation étaient uniquement attribuables au type de réponse). D'ailleurs, des analyses supplémentaires ont également révélé que lorsque l'on combine les activations observées pour les stimuli naïfs et scientifiques, ce qui a pour effet d'annuler la différence entre les deux groupes au niveau du type de réponses fournies, la région du CPVL droit demeure activée chez les experts (voir tableau 4.3). Cette hypothèse alternative présentant des failles importantes, elle semble donc pouvoir être écartée : les différences d'activation observées ne pourraient pas être attribuables uniquement au type de réponses fournies par les participants.

Une question reste cependant à explorer : pourquoi les experts mobilisent-ils davantage les régions associées à l'inhibition lorsqu'ils évaluent des stimuli naïfs, mais pas lorsqu'ils évaluent des stimuli scientifiques ? De façon spontanée, on pourrait croire que ces participants auraient aussi besoin de mobiliser leurs régions

préfrontales, et donc d'inhiber, pour ce type de stimuli. Il aurait en effet pu paraître nécessaire qu'ils surmontent leur tendance à raisonner de façon naïve (c'est-à-dire à affirmer que les stimuli scientifiques sont faux), pour parvenir à donner une bonne réponse (en affirmant que les stimuli sont corrects). Or, une hypothèse possible pour expliquer cette absence de différence d'activation serait que la formation scientifique des experts les ait conduits à automatiser davantage leur mode de réponse scientifique, à un point tel qu'ils n'ont plus à faire preuve d'inhibition en tout temps, mais uniquement lors d'une situation où ils sont directement confrontés à la conception fréquente (comme c'est le cas lors de la présentation des stimuli naïfs).

Après avoir passé en revue les différentes hypothèses envisageables, nous considérons la proposition suivante comme étant à notre avis la plus plausible : **les experts réalisent une étape de plus que les novices au niveau du traitement et de l'analyse cérébrale. Nous postulons que cette étape supplémentaire consiste à inhiber leur conception fréquente. La capacité à inhiber serait donc liée à l'expertise en mécanique.**

5.2.5 Inhibition et réseaux de neurones

En somme, les résultats de cette recherche pointent vers l'idée qu'à la suite d'une formation scientifique en mécanique, deux réseaux de neurones coexisteraient (soit distinctement ou de façon enchevêtrée) : un premier réseau de neurones rattaché à la conception naïve et un second réseau de neurones lié à la conception scientifique, réseau que la formation, et donc l'apprentissage, aurait permis de développer. Par conséquent, un individu devenu expert en mécanique ne se serait probablement pas départi de sa conception naïve initiale et aurait plutôt appris à inhiber activement celle-ci pour être en mesure de produire de bonnes réponses à des questions scientifiques.

Les données semblent en effet indiquer que les experts détiendraient toujours un réseau de neurones associé à la conception « plus une balle est lourde, plus elle tombe rapidement ». Il est fort probable que ce réseau de neurones se soit développé avant le début de leur parcours scientifique. Thouin (2004) soutient que cette conception (et donc le réseau de neurones qui lui est associé) proviendrait d'une « inférence basée sur l'impression que l'attraction gravitationnelle terrestre est fonction du poids des objets attirés par la Terre » (p. 99). Il est également probable que cette conception provienne en partie des interactions ordinaires des apprenants avec la réalité physique qui les environne, puisque dans la vie de tous les jours, il n'est pas possible de faire l'expérience d'un environnement pour lequel cette conception fréquente s'avère fausse (c'est-à-dire un environnement sans résistance de l'air). Les participants de cette recherche n'avaient donc jamais expérimenté les conditions propres à la situation présentée dans la tâche cognitive. À l'inverse, ils avaient vraisemblablement vécu une existence qui, sur une base ininterrompue, a pu renforcer l'idée qu'un objet lourd tombe plus vite qu'un objet léger. Par exemple : on glisse plus rapidement en traîneau à neige dans une pente lorsqu'on est plus lourd ; un objet lourd qui tombe sur son pied fait plus mal qu'un objet léger (ce qui peut laisser entendre que l'objet lourd tombe plus vite), etc. La conception scientifique, c'est-à-dire la perspective newtonienne, s'oppose donc, en quelque sorte, à l'expérience vécue. Par ailleurs, le réseau de neurones rattaché à la conception naïve pourrait également provenir de l'application d'une règle plus générale de type « More A – More B », tel que proposé par Stavy et Tirosh (2000) dans leur théorie des règles intuitives. La conception naïve serait alors attribuable à une utilisation de la règle dans un contexte où elle présente une bonne utilité cognitive (Ohlsson, 2009), mais une insuffisance scientifique.

Au niveau cérébral, la création de ce réseau de neurones lié à une conception naïve peut s'expliquer en s'appuyant sur le modèle classique de Hebb (1949). En effet, selon ce modèle, deux neurones qui s'activent en même temps, fréquemment, se

connecteront progressivement ensemble. Il est donc fort probable que la conception selon laquelle « plus une balle est lourde, plus elle tombe rapidement » ait été associée à des expériences qui renforçaient cette représentation ou encore, de manière plus générale, au fait d'avoir utilisé souvent un mode de raisonnement intuitif dans des contextes où celui-ci menait à des réponses adéquates. La création du réseau de neurones associé à la conception naïve s'expliquerait donc par la mobilisation récurrente et simultanée des neurones qui le composent. De plus, comme l'efficacité des connexions neuronales peut être augmentée grâce à la répétition, la ténacité et la résistance de la conception naïve en mécanique pourraient donc être attribuables au fait que celle-ci a été renforcée à maintes reprises, dans le cadre d'expériences quotidiennes où elle s'avérait exacte.

L'analogie de la forêt proposée par Potvin (2011) illustre d'ailleurs bien cette idée. Ce dernier compare les innombrables réseaux de neurones du cerveau à une forêt difficile à traverser. Il affirme : « Dans les forêts, on trouve pourtant des sentiers qui semblent moins éphémères. C'est que ces derniers existent et perdurent par l'usage qui en est fait » (p. 214). Les réseaux de neurones associés aux conceptions initiales seraient donc comme des sentiers qui se sont creusés dans la forêt et qui se sont avérés utiles, car ils ont déjà permis d'accomplir certaines tâches avec succès. Ils ont par conséquent été empruntés à maintes reprises et sont peu à peu devenus automatisés. À l'image du sentier, la nouvelle conception scientifique doit, elle aussi, s'établir un chemin dans le cerveau lors d'un apprentissage, mais il lui est bien difficile, au départ, de rivaliser avec le sentier déjà bien établi de la conception naïve. Le fait d'emprunter souvent le même chemin, de mobiliser fréquemment le réseau de neurones associé à la conception scientifique, fera en sorte que ce réseau deviendra de plus en plus efficace et s'automatisera, tel un chemin qui devient de plus en plus praticable.

Dans le cadre de cette recherche, on constate que la formation scientifique semble en effet avoir mené au développement progressif d'un second réseau de neurones associé à la conception scientifique. Le développement de ce nouveau réseau n'apparaît pas avoir provoqué l'éradication du réseau naïf initial. On observe plutôt que, grâce à sa formation scientifique, l'expert a développé la capacité à détecter qu'une situation impliquant une conception fréquente exigeait qu'il réalise un travail cérébral particulier. En mobilisant les régions préfrontales dorsolatérale et ventrolatérale de son cerveau, il est alors parvenu à comparer ses deux conceptions (ses deux réseaux de neurones) et à inhiber l'activation intuitive et automatique du réseau de neurones associé à sa conception naïve afin de répondre conformément à sa conception scientifique.

De façon générale, les données recueillies appuient ainsi l'idée, défendue par de nombreux chercheurs (De Neys, 2006a, 2006b, 2008a, 2008b; Evans, 2003, 2005), selon laquelle il existerait dans certaines circonstances un double processus de raisonnement (*double-process of thinking*). Ce processus serait composé de deux types de raisonnements : un raisonnement de type heuristique et un raisonnement de type analytique. Selon ces chercheurs, le raisonnement de type heuristique serait contextualisé, intuitif, et rapide, donc plus économique d'un point de vue cognitif. Il pourrait cependant mener à commettre des erreurs en privilégiant l'utilisation spontanée d'une conception fréquente dans un contexte qui n'est pas approprié. Le raisonnement analytique serait quant à lui plus exigeant d'un point de vue cognitif, moins rapide et plus général. L'idée d'un double processus suggère que ces deux types de raisonnement entreraient en compétition dans le cerveau et que la mise en place des mécanismes de contrôle cognitif permettrait de préconiser l'usage d'un raisonnement plus analytique lorsque la situation l'exige. Par ailleurs, cela ne veut pas nécessairement dire que l'expertise scientifique serait liée de façon définitive à l'utilisation d'un raisonnement analytique. Une hypothèse envisageable serait que ce

mode de raisonnement représente un état intermédiaire ou temporaire permettant d'automatiser l'utilisation, dans certains contextes, des réseaux de neurones associés à certaines conceptions scientifiques. Il serait possible qu'un expert puisse par la suite être en mesure de raisonner de nouveau de manière heuristique (c'est-à-dire rapidement et avec moins d'effort), mais en s'appuyant alors sur des conceptions scientifiques très bien enracinées. Bien qu'ils ne permettent pas de vérifier spécifiquement cette hypothèse, les résultats de notre recherche indiquent cependant que le mécanisme cérébral de l'inhibition serait central dans le processus de raisonnement analytique et plus particulièrement, dans le raisonnement scientifique en mécanique. Les résultats obtenus permettent donc d'envisager cette théorie du raisonnement dans le contexte précis de la didactique des sciences, et, de ce fait, de la rapprocher du domaine de l'éducation.

D'ailleurs, le fait de savoir que la formation scientifique peut jouer un rôle dans le développement de la capacité à inhiber, et donc à adopter un raisonnement scientifique, a des incidences sur la façon de concevoir le processus du changement conceptuel (car les résultats obtenus sont plus compatibles avec certains modèles plutôt que d'autres) ainsi que sur les pratiques d'enseignement des sciences.

5.3 Incidences sur l'apprentissage et l'enseignement des sciences

5.3.1 Inhibition et changement conceptuel

Au chapitre 2, plusieurs modèles de changement conceptuel ont été présentés (section 2.1.3) et discutés (section 2.1.4). Il ressortait de cette discussion que les différents modèles proposaient des idées plutôt divergentes concernant l'évolution des préconceptions des élèves à la suite d'un changement conceptuel. Ces nombreux modèles sont donc ici revus à la lumière des résultats de recherche obtenus. L'idée

principale qui ressort de cette étude est que les préconceptions des élèves ne semblent pas disparaître de leur cerveau à la suite d'un changement conceptuel : elles demeureraient accessibles et coexisteraient avec les conceptions scientifiques. Le changement qui s'opèrerait au cours du processus de changement conceptuel ne serait donc pas un changement de conceptions en tant que telles : ces dernières ne seraient ni remplacées, ni restructurées. Le changement aurait plutôt lieu au niveau du développement d'un processus cérébral alternatif permettant d'inhiber les conceptions naïves au profit de l'utilisation de conceptions scientifiques.

Bien que la majorité des auteurs des modèles présentés ne se positionnent pas explicitement sur la question de l'évolution des conceptions des élèves, nous avons choisi de revoir et d'analyser ces modèles à la lumière des résultats obtenus en les classant en deux catégories. La première catégorie, que l'on nomme la **catégorie de la transformation**, comprend des modèles qui, selon notre interprétation, sont moins compatibles avec les données de la présente recherche. Cette catégorie est composée, entre autres, des modèles de Naussbaum et Novick (1982), Posner et al. (1982), Giordan et de Vecchi (1987) et Vosniadou (1994). Ces quatre modèles impliquent en effet des modifications substantielles au niveau des conceptions ou encore des structures englobant les conceptions. L'ampleur de ces modifications laisse entendre que les préconceptions des élèves ne seraient plus accessibles à la suite d'un changement conceptuel.

Les modèles de Naussbaum et Novick ainsi que de Posner et ses collaborateurs présentent tous deux le changement conceptuel comme étant le résultat d'une accommodation. En effet, selon ces chercheurs, les conceptions des élèves seraient considérablement modifiées ou encore remplacées par des conceptions étant plus conformes au savoir scientifique durant le processus de changement conceptuel. Il apparaît donc que ces deux modèles ne sont pas aisément compatibles avec les

données de la présente recherche. En effet, si les conceptions initiales étaient simplement remplacées par de nouvelles conceptions, les experts ne présenteraient pas des activations plus importantes que les novices dans plusieurs régions cérébrales associées à l'inhibition.

De façon similaire, le modèle de Giordan et de Vecchi décrit le changement conceptuel comme un processus de transformation profonde des conceptions. Selon ce modèle, les conceptions initiales des élèves ne seraient plus accessibles à la suite d'un changement conceptuel, car elles se seraient radicalement transformées pour correspondre de plus en plus au savoir scientifique. Encore une fois, ce modèle s'harmonise difficilement aux résultats obtenus, car les activations observées dans les régions préfrontales liées à l'inhibition semblent indiquer que les conceptions initiales des experts seraient toujours accessibles à la suite d'un changement conceptuel. Selon ces résultats, il apparaît que des élèves ayant réalisé un apprentissage de nature scientifique retiendraient toujours la trace de leur première conception (qui demeurerait encodée dans leur cerveau), en plus de la nouvelle conception scientifique. Le modèle avancé par Giordan et de Vecchi propose une explication qui ne va pas en ce sens.

Pour Vosniadou, le changement conceptuel passe par une modification, ou une révision, des cadres théoriques naïfs dans lesquels sont imbriquées les présuppositions de l'élève, provoquant ainsi une réorganisation profonde des structures de connaissances existantes. Cette restructuration sous-entend que les connaissances initiales ne seraient plus disponibles à la suite d'un changement conceptuel, ce qui ne concorde pas non plus avec les données obtenues. Pour que ce modèle soit plus compatible avec les résultats de la présente recherche, il faudrait, par exemple, qu'il reconnaisse la possibilité que les présuppositions initiales des élèves

puissent survivre à une révision des cadres théoriques et cohabiter avec de nouvelles présuppositions.

La deuxième catégorie de modèles, appelée ici la **catégorie de la coexistence**, comprend les modèles de diSessa (1993), Stavy et Tirosh (2000) et Bélanger (2008). Malgré le fait que diSessa ainsi que Stavy et Tirosh n'abordent pas explicitement l'idée d'une coexistence des conceptions, les postulats à la base des trois modèles classés dans cette catégorie décrivent tous le changement conceptuel de telle sorte que les conceptions initiales des apprenants demeurent accessibles à la suite d'un apprentissage. Ils s'harmonisent donc plus facilement aux résultats de la présente recherche.

Pour diSessa, ce ne sont pas les conceptions mêmes qui changent dans le changement conceptuel, mais plutôt l'agencement, l'organisation ou la façon dont sont utilisées les p-prims (principes abstraits et intuitifs) qui composent les conceptions. Il est donc possible de croire qu'à la suite d'un changement conceptuel, les conceptions initiales demeurent disponibles si les p-prims qui les constituent parviennent à s'organiser comme elles l'étaient au départ. Les conceptions naïves pouvant s'avérer efficaces dans certains contextes, un individu serait ainsi en mesure d'organiser différemment ses p-prims selon qu'il ait besoin de répondre de manière scientifique ou naïve. Les deux conceptions coexisteraient alors « en pièces détachées » dans le cerveau (probablement sous la forme d'un réseau de neurones formé de plusieurs sous-réseaux) et l'agencement des sous-unités formant les conceptions dépendrait du contexte de leur utilisation. Les activations préfrontales des experts que l'on associe au mécanisme de l'inhibition pourraient être le reflet de l'inhibition d'un agencement spontané de p-prims (c'est-à-dire de l'activation spontanée de sous-réseaux de neurones) qui n'est pas approprié.

Le modèle des règles intuitives proposé par Stavy et Tirosh laisse aussi entendre que les conceptions initiales des élèves demeureraient disponibles à la suite d'un changement conceptuel. En effet, pour ces chercheurs, les conceptions fréquentes s'appuieraient sur l'utilisation de règles intuitives qui s'avèrent souvent efficaces dans de nombreux contextes, mais qui parfois, mènent à la formulation de réponses erronées. Lors d'un changement conceptuel, un élève ne modifierait pas sa conception ou ne se départirait pas de sa règle intuitive, mais apprendrait plutôt à ne pas l'utiliser dans certains contextes précis, à utiliser une autre règle intuitive ou encore à utiliser la même règle intuitive, mais d'une manière différente. Un exemple d'une utilisation différente de la même règle intuitive pourrait être le suivant : la règle « More A – More B » pourrait, avant un changement conceptuel, soutenir la conception « plus de force entraîne plus de vitesse » et, après un changement conceptuel, devenir le point d'appui de la conception « plus de force entraîne plus d'accélération ». Le modèle de Stavy et Tirosh va de pair avec les données de notre recherche, car il suggère qu'une conception naïve (découlant de l'utilisation inadéquate d'une règle intuitive) pourrait cohabiter avec une conception scientifique (provenant du choix de ne pas s'appuyer sur la règle intuitive initiale ou de l'utiliser différemment). Les activations préfrontales observées chez les experts pourraient ainsi signifier que ces participants inhibaient leur tendance automatique à vouloir répondre en prenant appui sur une règle intuitive qui ne pouvait être utilisée dans ce contexte. Il demeure néanmoins possible que les participants aient répondu en s'appuyant sur une autre règle intuitive qui elle s'avérait efficace. Une autre possibilité serait que les participants aient continué à utiliser leur règle intuitive initiale, mais d'une manière différente (il s'agirait alors, non pas d'une inhibition de la règle intuitive en tant que telle, mais d'une inhibition de l'association qui était faite au départ entre la règle intuitive et la conception erronée).

Finalement, le modèle de Bélanger stipule clairement que les conceptions naïves des élèves coexisteraient avec les conceptions scientifiques. Selon ce modèle, le changement conceptuel représenterait un processus cumulatif dans le cadre duquel une nouvelle conception s'ajouterait à une conception existante : une conception naïve et une conception scientifique pourraient ainsi cohabiter dans le cerveau et chacune détiendrait son propre contexte de validité. Ce modèle s'apparente en ce sens à ceux de Solomon (1983, 1984), de Mortimer (1995) et d'Ohlsson (2009), car il aborde explicitement l'idée d'une cohabitation de plusieurs conceptions. Il se distingue par ailleurs légèrement des modèles de diSessa ainsi que de Stavy et Tirosh, car il ne présente pas la coexistence de la même manière. Alors que ceux-ci laissent entendre que la coexistence proviendrait d'une réorganisation de sous-unités pouvant être partagées à la fois par les conceptions naïves et scientifiques, Bélanger présente plutôt la coexistence comme étant une cohabitation entre plusieurs conceptions distinctes. Le modèle de changement conceptuel qu'il propose concorde facilement avec les résultats obtenus. Au niveau neuronal, la coexistence de deux conceptions (naïve et scientifique) impliquerait vraisemblablement la mise en place, en parallèle, de deux réseaux de neurones distincts. Les activations préfrontales observées dans le cadre de notre recherche seraient le reflet de la mobilisation d'un processus d'inhibition visant à bloquer l'utilisation du réseau de neurones associé à la conception naïve, le contexte exigeant que le participant mobilise plutôt le réseau de neurones en lien avec la conception scientifique afin de répondre correctement.

Somme toute, les résultats obtenus, en pointant vers l'idée d'une coexistence des réseaux de neurones associés aux conceptions naïves et scientifiques, s'opposent à la description ou à la structure que proposent plusieurs modèles classiques du changement conceptuel, modèles qui sont pourtant largement utilisés et cités dans les écrits scientifiques. Les activations cérébrales observées remettent effectivement en question l'idée d'une transformation des conceptions initiales des élèves qui rendrait

celles-ci inaccessibles à la suite d'un apprentissage. Appuyant l'idée d'une coexistence des conceptions, ces activations semblent plutôt indiquer que l'inhibition serait un élément important du processus d'apprentissage des sciences, ce qui avait d'ailleurs été avancé auparavant par plusieurs recherches comportementales (Kelemen & Rosset, 2009; Kelemen et al., 2012; Lombrozo, Kelemen et Zaitchik, 2007; Shtulman & Valcarcel, 2012; Zaitchik & Solomon, 2008).

Il convient donc d'analyser les incidences que peut avoir l'identification de ce mécanisme cérébral sur l'enseignement de la mécanique, et plus largement, sur l'enseignement des sciences.

5.3.2 Inhibition et enseignement des sciences

Les résultats obtenus au niveau du cortex préfrontal vont de pair avec ceux obtenus par Dunbar, Fulgelsang et Stein (2007) et Masson (2012). Ces activations cérébrales suggèrent que le développement de l'expertise scientifique aurait des effets tangibles sur le fonctionnement du cerveau, puisque le cerveau des experts et des novices en sciences réagit différemment lorsqu'ils évaluent le même type de stimuli. Étant donné que les activations sont plus prononcées dans le cortex préfrontal pour les experts que pour les novices, il semble que l'inhibition jouerait un rôle important dans l'apprentissage de concepts en physique mécanique. Durant le processus d'apprentissage de la mécanique, un élève apprendrait donc davantage à inhiber ses conceptions fréquentes qui lui viendraient spontanément à l'esprit plutôt qu'à les éradiquer ou les restructurer. C'est sans doute le développement de cette capacité à inhiber ses conceptions fréquentes qui favoriserait l'apprentissage scientifique et qui permettrait, du moins en partie, de devenir expert en physique mécanique.

Ce concept d'inhibition semble donc jouer un rôle crucial dans l'apprentissage et il permet de jeter un regard nouveau et d'analyser autrement le parcours d'apprentissage scientifique des élèves : au lieu de simplement considérer que les élèves « font des erreurs », il est désormais possible d'attribuer ces erreurs à leur sélection (ou mobilisation) d'une conception alternative qu'ils ne parviennent pas à inhiber.

Outre le domaine de la didactique des sciences, il semble d'ailleurs que l'inhibition soit considérée comme étant fondamentale dans plusieurs domaines, tels que le développement du raisonnement logique (Houdé, 2000, 2001; Houdé et al., 2011; Stavy et Babai, 2010). En éducation, on met souvent de l'avant l'idée d'une construction de connaissances selon laquelle les anciennes conceptions seraient largement modifiées ou même remplacées. Les résultats de la présente recherche indiquent cependant qu'il serait préférable, plutôt que de chercher à éradiquer ou à remplacer les conceptions initiales, de les « endurer », en quelque sorte, et de canaliser les efforts d'enseignement vers un apprentissage de la capacité à reconnaître (consciemment ou non) un mode de réponse spontané ainsi que sur le développement de la capacité des élèves à inhiber.

Toutefois, le concept d'inhibition semble, jusqu'à ce jour, peu utilisé dans les recherches en éducation et même très peu mentionné dans les écrits scientifiques liés au domaine de l'éducation. Pourtant, certains chercheurs (Houdé, 2004, 2009) affirment que l'inhibition serait à la base de tout le processus de développement humain et l'idée que l'inhibition ait un rôle à jouer dans l'apprentissage des sciences présente donc un potentiel hautement intéressant pour le monde de l'éducation. Bien entendu, cette recherche n'a été menée que pour un concept scientifique précis : l'effet de la masse sur la chute des objets. Elle appuie toutefois les résultats obtenus en électricité (Masson, 2012) et cela laisse croire que l'inhibition pourrait jouer un

rôle dans l'apprentissage de plusieurs disciplines scientifiques. Il faudrait néanmoins poursuivre les recherches en ce sens afin de voir si le développement de la capacité à inhiber est important pour d'autres concepts en sciences.

Puisqu'il semble que l'inhibition détienne un rôle dans l'apprentissage de la mécanique et de l'électricité, et qu'il est possible, plus largement, qu'elle joue un rôle dans l'apprentissage des sciences, il devient alors intéressant et important de se questionner sur les façons de favoriser l'inhibition de conceptions fréquentes chez les élèves et de déterminer quels sont les contextes d'apprentissage qui nécessitent d'inhiber. Cela permettrait d'améliorer et d'optimiser considérablement les pratiques d'enseignement des sciences. Certaines pistes intéressantes d'intervention sont déjà étudiées et un enseignement par inhibition serait susceptible d'aider les élèves à surmonter leurs préconceptions (Houdé et al., 2000, 2001). Cet enseignement pourrait comprendre à la fois des alertes émotives (du type : « Attention! Il y a un piège dans cette question et tu dois y résister ») ainsi qu'une période d'entraînement à l'identification des réponses pièges. Étant donné que l'étape préalable à la réponse même d'inhibition est celle de la détection d'un conflit, il semble en effet pertinent de chercher à induire un doute chez l'élève quant à sa capacité de résoudre un problème ou de répondre à une question (notamment par le biais des alertes émotives) ainsi que de vouloir rendre explicite sa conception initiale de façon à ce qu'il soit éventuellement capable de la reconnaître lorsqu'elle s'active. De cette façon, en étant conscient de la présence de cette fausse conception et en ayant appris à s'en méfier, il aurait la capacité de refuser de la mobiliser. Cette idée d'une « didactique de l'inhibition » représente donc un point de départ intéressant qu'il serait pertinent d'approfondir dans le cadre précis de l'enseignement des sciences.

Finalement, la persistance des conceptions initiales dans le cerveau indique qu'il est préférable de ne pas présumer, dès qu'un élève manifeste une conception scientifique

ou un comportement attendu (en lien avec un sujet précis), que son apprentissage est définitivement réalisé et qu'il n'est plus nécessaire de consentir des efforts d'enseignement par rapport à ce sujet. L'idée d'une coexistence entre conceptions naïves et scientifiques mène plutôt à penser qu'il ne s'agit que d'un premier pas dans le processus de changement conceptuel et qu'il est nécessaire, comme le propose Masson (2012), de réaliser des « allers-retours » fréquents entre la conception initiale et la conception scientifique de façon à convaincre les élèves que, pour certaines situations, la nouvelle conception est nettement préférable à l'ancienne.

Présumer trop rapidement qu'un élève a réalisé un apprentissage, c'est en quelque sorte oublier de considérer l'attrait et la facilité liée à l'utilisation de la conception naïve par rapport à la conception scientifique. Le fait de réaliser des « allers-retours » continuels entre ces deux représentations pourrait donc favoriser la comparaison systématique de celles-ci, aboutir en la sélection répétée de la conception scientifique (dû à l'inhibition de la conception initiale) et, ultimement, permettre de transformer le « sentier » associé à cette conception scientifique en une véritable « autoroute » (Potvin, 2011, p. 214), amenant ainsi les élèves à devenir des experts ayant développer leur capacité à inhiber.

Le mécanisme cérébral de l'inhibition semble donc jouer un rôle central dans l'apprentissage des sciences et il apparaît primordial d'aspirer à mieux le comprendre par le biais de nouvelles recherches dont les retombées pourront être profitables au milieu de l'éducation et, au bout du compte, aux élèves.

CHAPITRE VI

CONCLUSION

En enseignement des sciences, il est reconnu que les interventions pédagogiques se heurtent souvent aux conceptions erronées qu'entretiennent les élèves à propos de différents phénomènes naturels (Carey, 2000; Thouin, 1996, 2004a, 2004b; Toussaint, 1991). Le domaine de la physique mécanique n'y échappe pas : de nombreuses recherches indiquent en effet qu'il s'agirait de l'un des domaines causant le plus de difficulté aux élèves (Brown & Hammer, 2008). En effet, malgré un enseignement substantiel dans cette discipline, plusieurs élèves commettraient des erreurs par rapport à des concepts qui sont pourtant de base. Le champ de recherche du changement conceptuel étudie depuis longtemps le processus par lequel un individu évolue d'une préconception vers une conception plus conforme au savoir scientifique, c'est-à-dire à ce qui est enseigné en salle de classe. Cependant, les mécanismes responsables de ce processus demeurent mal connus et les modèles proposés par les chercheurs ne présentent pas une vision consensuelle de ce qui advient des conceptions fréquentes des élèves à la suite d'un changement conceptuel.

L'objectif principal de cette recherche était donc d'apporter de nouvelles informations sur le processus de changement conceptuel en vérifiant si les experts en physique mécanique détiennent toujours de fausses conceptions qu'ils doivent inhiber pour répondre de manière scientifique. Il s'agissait concrètement de vérifier si les régions cérébrales généralement associées à l'inhibition (entre autres le cortex cingulaire antérieur et les régions du cortex préfrontal) ont un rôle à jouer dans

l'expertise en physique mécanique. Pour ce faire, deux groupes de participants ont été comparés : un groupe de 19 novices n'ayant pas réalisé de changement conceptuel et un groupe de 10 experts qui sont présumés avoir déjà réalisé un changement conceptuel. Des images du cerveau des participants ont été prises alors qu'ils réalisaient une tâche cognitive en physique mécanique dans un appareil d'IRMf. Deux types de films leur ont été présentés : des films naïfs, non conformes aux lois du mouvement de Newton, des films newtoniens, conformes aux mêmes lois ainsi que des films contrôle. Les participants devaient juger si les films étaient corrects ou incorrects. Cette méthode a permis d'identifier quelles étaient les régions qui étaient plus activées chez les experts et chez les novices pour chaque type de stimuli.

Les données obtenues montrent que les novices et les experts réalisent un travail cérébral différent lorsqu'ils évaluent les stimuli présentés (naïfs, scientifique et contrôle). Les activations cérébrales observées laissent entendre que les experts réaliseraient une étape d'analyse cérébrale de plus que les novices. Lors de l'évaluation des stimuli naïfs, dans lesquels une balle plus lourde tombe au sol plus rapidement qu'une balle plus légère, on constate que les experts présentent des activations significativement plus prononcées que les novices dans certaines régions de leur cerveau. Ces régions sont le cortex préfrontal dorsolatéral (CPDL) et le cortex préfrontal ventrolatéral (CPVL). Dans la littérature scientifique, il s'agit de régions cérébrales qui sont souvent associées au fait de devoir surmonter une réponse intuitive ou une stratégie automatique ou spontanée (Chambers, Garavan, & Belgrove, 2009; Houdé, 2004; Ward, 2010).

La conclusion principale de cette recherche est que l'inhibition semble jouer un rôle important dans l'expertise scientifique en mécanique. Les résultats obtenus appuient en effet l'idée selon laquelle les experts en mécanique détiendraient toujours leur

conception naïve selon laquelle une balle plus lourde tombe plus rapidement qu'une balle plus légère. Leur formation scientifique leur aurait cependant permis de développer, en parallèle, un réseau de neurones associé à une conception plus conforme aux savoirs scientifiques et les activations des régions préfrontales observées dans le cadre de cette recherche sont un signe que la formation scientifique en mécanique aurait permis aux experts de développer la capacité à inhiber leur conception initiale, au profit de l'utilisation de leur conception scientifique. Pour apprendre des concepts scientifiques en mécanique, il ne s'agirait donc pas seulement d'apprendre et de cumuler de nouvelles connaissances, mais également d'apprendre à inhiber ses conceptions fréquentes qui mènent, dans certaines situations, à des réponses erronées. Ces résultats appuient ceux obtenus par Masson (2012) en électricité et cela laisse entendre que l'inhibition aurait peut-être un rôle à jouer dans l'apprentissage de plusieurs disciplines scientifiques.

Cette approche neuroéducative du changement conceptuel introduit ainsi une nouvelle perspective de l'apprentissage des sciences qui présente un potentiel éducatif intéressant. En effet, le fait de mieux comprendre les mécanismes cérébraux qui sous-tendent le processus de changement conceptuel et d'identifier précisément l'inhibition comme étant un élément clé de ce processus peut avoir des incidences importantes sur la pratique enseignante. À l'heure actuelle, les résultats de cette recherche permettent de formuler quelques pistes de recommandations pédagogiques.

D'abord, un enseignement optimal des sciences ne devrait pas viser l'éradication ou le remplacement de la conception initiale, mais plutôt le développement de la capacité à inhiber cette conception. Ensuite, il serait intéressant de chercher à induire un doute dans la tête des élèves quant à leurs conceptions ou leurs réponses, de façon à ce qu'ils développent le réflexe de se méfier des réponses ou des

explications qu'ils pourraient vouloir spontanément donner à un problème. Le fait d'induire un doute dans la tête de l'élève lui permettrait alors d'envisager une autre explication possible et lui donnerait, à plus long terme, le pouvoir de refuser de mobiliser sa conception initiale. Finalement, il ne faudrait pas tenir pour acquis que les élèves ont réalisé un apprentissage scientifique dès qu'ils fournissent, pour la première fois, la réponse que l'on attendait. La répétition serait essentielle, car elle permettrait de consolider le réseau neuronal associé à la conception scientifique, ce qui faciliterait et optimiserait par la suite son utilisation.

Cependant, la limite principale de cette étude est qu'elle ne permettait pas de faire l'étude du changement conceptuel de manière directe, car celui-ci était mesuré par le biais d'une comparaison entre novices et experts. Il serait donc intéressant, dans le cadre de recherches futures, d'étudier le processus du changement conceptuel en collectant des données cérébrales juste avant et après un changement conceptuel. Cela pourrait être fait en réalisant la collecte de données dans un appareil d'imagerie avant et après une intervention pédagogique ou encore en étudiant le changement conceptuel de manière longitudinale, c'est-à-dire en observant l'évolution cérébrale d'élèves à différents stades de leur apprentissage des sciences.

La conduite de recherches supplémentaires demeure donc essentielle afin d'approfondir notre connaissance du rôle de l'inhibition. Il devient maintenant important de déterminer quels sont les moyens de favoriser le développement de ce mécanisme, quelles sont les caractéristiques des apprentissages et des contextes scolaires pour lesquels il apparaît nécessaire d'inhiber et quels sont les effets cérébraux de différentes méthodes d'enseignement des sciences.

Le domaine de la neurodidactique des sciences n'est, pour le moment, pas aussi développé que ceux de la neurodidactique de la lecture ou des mathématiques, mais

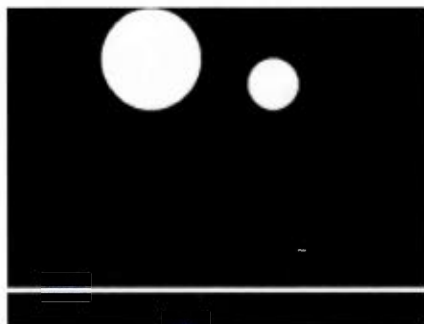
les pistes pédagogiques qu'il permet de formuler indiquent qu'une première partie du chemin a déjà été parcourue. Bien que les résultats de la présente étude doivent être interprétés avec une certaine prudence, ils permettent néanmoins d'entrevoir une nouvelle perspective de l'apprentissage et de l'expertise scientifiques. De façon plus générale, ces résultats cérébraux démontrent aussi que la neuroéducation constitue une avenue pertinente et même souhaitable, car elle permet d'envisager les processus d'apprentissage et d'enseignement sous un angle inédit et elle ouvre la voie à la découverte de connaissances nouvelles qui s'ajoutent à celles déjà obtenues par le passé.

APPENDICE A – QUESTIONNAIRE UTILISÉ LORS DE LA SÉLECTION DES PARTICIPANTS

Questionnaire

Question 1

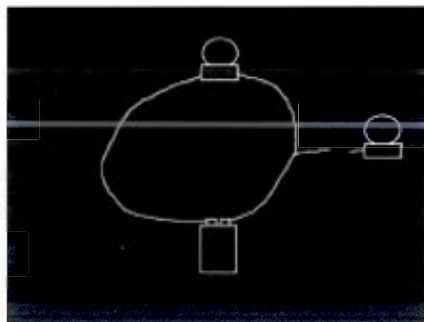
Les deux balles présentées sur l'image ci-dessous sont constituées de plomb. Si on pouvait tenir les deux balles dans nos mains, nous pourrions sentir que les deux balles sont lourdes, mais que la plus grande des deux balles est sensiblement plus lourde. Si on laisse tomber ces deux balles (en même temps et de la même hauteur) sur le plancher de la bibliothèque, qu'observera-t-on selon vous?



- A. Les balles ne tomberont pas; elles flotteront dans l'air.
- B. La balle la plus petite tombera plus vite.
- C. La balle la plus grande tombera plus vite.
- D. Les deux balles tomberont sensiblement à la même vitesse.

Question 2

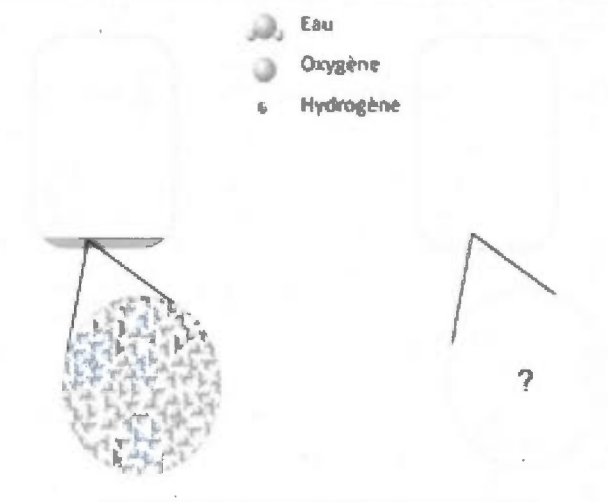
L'image ci-dessous présente un circuit électrique qui comprend : une pile (en bas du schéma), deux ampoules (en haut et à droite du schéma) et des fils (lignes du schéma). Si la pile est fonctionnelle de même que les deux ampoules, que devrait-il arriver?



- A. Les deux ampoules devraient s'allumer.
- B. Seule l'ampoule du haut devrait s'allumer.
- C. Seule l'ampoule de droite devrait s'allumer.
- D. Aucune des deux ampoules ne devrait s'allumer.

Question 3

Si nous chauffons, jusqu'à évaporation complète, une petite quantité d'eau (en gris sur l'image à gauche) dans un contenant fermé, à quoi ressembleront les molécules d'eau après l'évaporation?



A.



C.



B.



D.



Question 4

Selon vous, quel est le but principal d'un scientifique?

- A. Décrire la nature à l'aide d'équations mathématiques.
- B. Imaginer de nouvelles théories.
- C. Démontrer que les théories existantes sont fausses.
- D. Utiliser la science pour trouver des solutions aux problèmes de la société.

Question 5

L'image 1 ci-dessous présente, vue d'en haut, une balle qui roule au sol juste avant qu'on lui donne un coup dans la direction donnée par la flèche. Laquelle des trajectoires présentées à l'image 2 (A, B, C ou D) décrit le mieux le trajet que suivra la balle après le coup?

Image 1

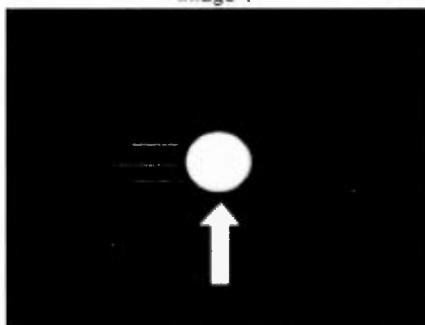
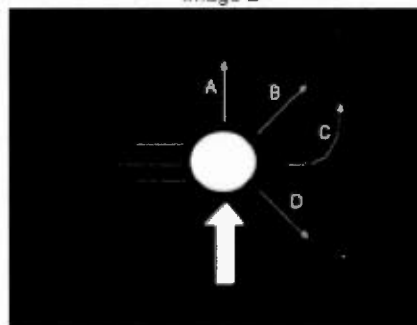
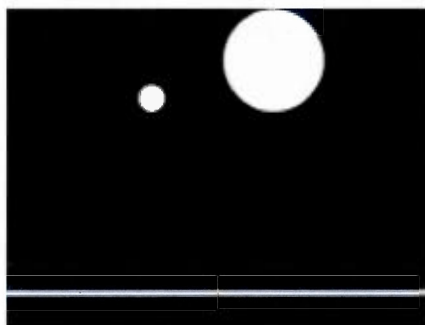


Image 2



Question 6

Les deux balles présentées sur l'image ci-dessous sont constituées de plomb. Si on pouvait tenir les deux balles dans nos mains, nous pourrions sentir que les deux balles sont lourdes, mais que la plus grande des deux balles est sensiblement plus lourde. Si on laisse tomber ces deux balles (en même temps et de la même hauteur) sur le plancher de la bibliothèque, qu'observera-t-on selon vous?

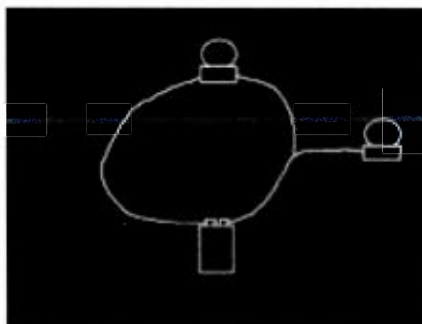


- A. La balle la plus petite tombera plus vite.
- B. Les balles ne tomberont pas; elles flotteront dans l'air.
- C. La balle la plus grande tombera plus vite.
- D. Les deux balles tomberont sensiblement à la même vitesse.



Question 7

L'image ci-dessous présente un circuit électrique qui comprend : une pile (en bas du schéma), deux ampoules (en haut à gauche et au dessus de la pile) et des fils (lignes du schéma). Si la pile est fonctionnelle de même que les deux ampoules, que devrait-il arriver?



- A. Les deux ampoules devraient s'allumer.
- B. Seule l'ampoule à droite devrait s'allumer.
- C. Seule l'ampoule en haut devrait s'allumer.
- D. Aucune des deux ampoules ne devrait s'allumer.

Question 8

L'image 1 ci-dessous présente, vue d'en haut, une balle qui roule au sol juste avant qu'on lui donne un coup dans la direction donnée par la flèche. Laquelle des trajectoires présentées à l'image 2 (A, B, C ou D) décrit le mieux le trajet que suivra la balle après le coup?

Image 1

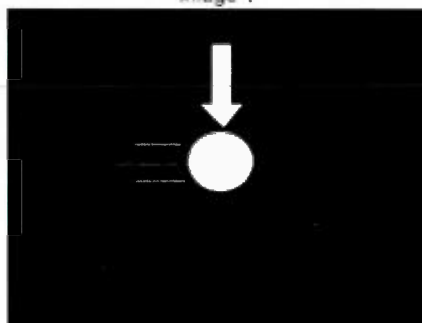
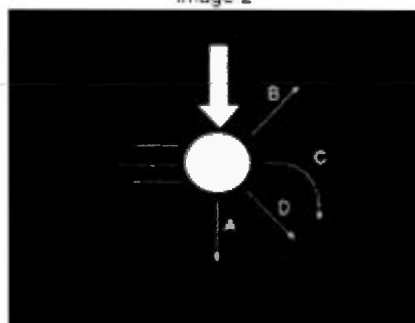
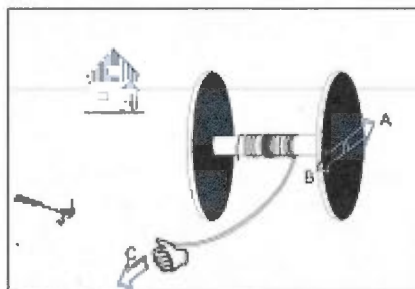


Image 2



Question 9

Dans un chantier de construction, on trouve un gros rouleau de bois abandonné (un de ces rouleaux qui servent habituellement à enrouler un tuyau de plastique). Le rouleau est posé sur le sol et n'est relié à aucune autre pièce. Si on enroule une corde autour, comme dans le schéma suivant, et qu'on tire dessus doucement dans la direction « C », comment le rouleau va-t-il se comporter?



- A. Le rouleau se déplacera dans la direction A.
- B. Le rouleau restera immobile.
- C. Le rouleau se déplacera dans la direction C.
- D. Le rouleau tournera sur place.

APPENDICE B - FORMULAIRE DE DÉPISTAGE

DÉPISTAGE PRÉLIMINAIRE POUR ÉTUDE D'IMAGERIE PAR RÉSONANCE MAGNÉTIQUE (IRM)

Veuillez écrire en caractère d'imprimerie

Nom :	Prénom :
Date de naissance : (jour/mois/année)	Sexe : F <input type="checkbox"/> M <input type="checkbox"/> Poids : ___ kg ___ lbs Grandeur : ___ m ___ pi
Chercheur (e) / Projet :	Numéro d'identification :

Afin d'assurer la sécurité de toute personne accédant au territoire de l'UNF, il est très important que ce questionnaire soit complété correctement.

1. Avez-vous déjà subi une opération ?

	Non	oui	Si oui, veuillez préciser le type d'opération et la date :
Tête			
Thorax ou cœur			
Abdomen			
Bras, mains			
Jambes, pieds			
Colonne vertébrale			
Yeux			
Autres :			

2. Portez-vous :

	non	oui
Stimulateur cardiaque (Pace-maker) ?		
Électrodes épicaudiques ?		
Clip pour anévrisme cérébral ?		
Prothèse cochléaire ? Prothèse auditive ?		
Filtre ou cathéter dans un vaisseau sanguin ?		
Neurostimulateur ?		
Stimulateur électronique pour les os ?		
Prothèse valvulaire cardiaque ?		
Corps étrangers métalliques ? (ex: balles, fragments d'obus, éclats métalliques)		
Pompe à insuline implantée ?		

APPENDICE C – FORMULAIRE DE CONSENTEMENT

RNQ

Comité mixte d'éthique de la recherche

FORMULAIRE D'INFORMATION ET DE CONSENTEMENT

TITRE DU PROJET DE RECHERCHE

Étude des mécanismes cérébraux sous-tendant les processus de changement conceptuel en physique

RESPONSABLE DU PROJET DE RECHERCHE

Responsable du projet :

Patrice Potvin, Université du Québec à Montréal, 514-987-3000, poste 1290

Collaborateurs :

Martin Riopel, Université du Québec à Montréal

Steve Masson, Université du Québec à Montréal

Lorie-Marlène Brault Foisy, Université du Québec à Montréal

ORGANISME SUBVENTIONNAIRE

Conseil de recherches en sciences humaines du Canada (CRSH)

PRÉAMBULE

Nous vous demandons de participer à un projet de recherche en neuroimagerie. Cependant, avant d'accepter de participer à ce projet de recherche, veuillez prendre le temps de lire, de comprendre et de considérer attentivement les renseignements qui suivent.

Le présent formulaire de consentement peut contenir des mots que vous ne comprenez pas. Nous vous invitons à poser toutes les questions que vous jugerez utiles au chercheur et aux autres membres du personnel affecté au projet de recherche et à leur demander de vous expliquer tout mot ou renseignement qui n'est pas clair.

QU'EST-CE QU'UNE RÉSONANCE MAGNÉTIQUE?

L'examen par résonance magnétique est une technique médicale qui donne des images de grande qualité du corps, du cerveau ainsi que de leur fonctionnement. Cette technique fait appel à une force naturelle présente autour de nous : le magnétisme. Ce champ magnétique intense est créé par un aimant.

La résonance magnétique permet également des examens par résonance magnétique fonctionnelle. Dans ce cas, l'appareil permet de voir les zones du cerveau qui deviennent actives lorsqu'on demande à une personne d'effectuer une tâche précise. Cette tâche peut être motrice, par exemple, lorsque l'on demande à la personne de bouger un doigt ou bien elle peut être cognitive, par exemple lorsque l'on demande à la personne d'effectuer un calcul mental, lire un mot ou encore regarder des photographies. Lorsqu'on demande à une personne d'effectuer une tâche, il y a augmentation de l'arrivée de sang dans la partie du cerveau qui contrôle cette activité. L'arrivée du sang provoque un changement dans le signal émis par le cerveau et cette modification de signal peut être détectée par l'appareil de résonance magnétique.

Pour l'examen d'imagerie par résonance magnétique, vous serez allongé sur un matelas qui sera lentement glissé dans un grand tube. Le tube est ouvert aux deux extrémités, il est muni d'une excellente aération et très bien éclairé. Un système d'interphone vous permettra de communiquer avec le technicien au besoin. Pour votre confort, on vous demandera de porter soit un casque d'écoute, soit des bouchons protecteurs qui seront installés dans vos oreilles, et ce, afin de diminuer les bruits importants qui sont émis par l'appareil. Pendant que l'appareil fonctionne, il est important que vous demeuriez immobile. Pour ce faire, un coussinet sera placé autour de votre tête afin d'assurer votre immobilité. Aucune substance ne vous sera injectée.

PRÉSENTATION DU PROJET DE RECHERCHE ET DE SES OBJECTIFS

Vous êtes invité à participer à un projet de recherche en neuroimagerie qui vise à identifier et à comprendre les mécanismes cérébraux qui sous-tendent l'apprentissage de concepts scientifiques particulièrement difficiles à acquérir.

Plus précisément, cette recherche vise à mieux comprendre les mécanismes cérébraux sous-tendant les processus de changement conceptuel en physique et en électricité en analysant l'activité cérébrale d'étudiants réalisant une tâche cognitive impliquant des circuits électriques et des balles en mouvement.

Trente étudiants seront recrutés pour participer à cette étude.

NATURE ET DURÉE DE VOTRE PARTICIPATION AU PROJET DE RECHERCHE

Ce projet de recherche se déroulera à l'Unité de Neuroimagerie Fonctionnelle de l'Institut universitaire de gériatrie de Montréal.

Votre participation à ce projet de recherche consistera à passer un examen d'imagerie par résonance magnétique tel que décrit précédemment. Pour cet examen nous vous demanderons d'effectuer certaines tâches qui nous permettront de capter les images de votre cerveau pendant que vous effectuerez ces tâches. La durée de ces tâches sera d'environ 60 minutes. La durée totale de votre participation à ce projet de recherche sera d'environ 2 heures, ce qui inclut les étapes préparatoires à l'examen d'imagerie par résonance magnétique.

▪ Description des tâches

Votre tâche cognitive consistera à déterminer, en appuyant sur l'un ou l'autre des boutons, si les films présentés sont en accord ou en désaccord avec ce à quoi vous vous attendez. Les films portent sur des balles en mouvement et des circuits électriques.

AVANTAGES POUVANT DÉCOULER DE VOTRE PARTICIPATION AU PROJET DE RECHERCHE

Il n'y a aucun avantage direct pouvant découler de votre participation au projet de recherche. Cependant, l'information recueillie permettra une meilleure compréhension de l'apprentissage en sciences.

INCONVÉNIENTS POUVANT DÉCOULER DE VOTRE PARTICIPATION AU PROJET DE RECHERCHE

Les conditions imposées par l'utilisation de l'imagerie par résonance magnétique peuvent entraîner un certain inconfort du fait de devoir rester immobile pendant l'examen et un inconfort pourrait également être associé au bruit que génère le fonctionnement de l'appareil. Vous pourriez aussi ressentir un certain stress ou une sensation de claustrophobie.

RISQUES POUVANT DÉCOULER DE VOTRE PARTICIPATION AU PROJET DE RECHERCHE

Selon les connaissances actuelles, votre participation à un examen d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle ne vous fera courir, sur le plan médical, aucun risque si vous ne présentez aucune contre-indication.

Par ailleurs, à cause de la puissance de ce champ magnétique émis par l'appareil, il est nécessaire de prendre certaines précautions. C'est pourquoi vous devez obligatoirement remplir un questionnaire détaillé afin de détecter toute contre-indication à la passation de cet examen tels que, par exemple, la présence d'un

stimulateur cardiaque, d'un clip d'anévrisme, de prothèse métallique, de prothèse ou clip valvulaire cardiaque, de présence de métal dans l'œil ou sur le corps, de tatouage, de piercing, de broches dentaires ou si vous souffrez de claustrophobie aiguë. Les femmes enceintes et celles qui allaitent ne devraient pas passer un examen d'imagerie par résonance magnétique (voir questionnaire en annexe).

La vérification rigoureuse de la présence de contre-indication sera assumée par le technologue en fonction à l'Unité de Neuroimagerie Fonctionnelle.

INDEMNISATION EN CAS DE PRÉJUDICE

Si, dans le cadre de votre participation à l'étude, vous deviez subir quelque préjudice que ce soit, vous recevrez tous les soins médicaux nécessaires, sans frais de votre part. En acceptant de participer à ce projet, vous ne renoncez à aucun de vos droits ni ne libérez les chercheurs, l'organisme subventionne ou l'établissement de leur responsabilité civile et professionnelle.

COMPENSATION POUR VOTRE PARTICIPATION

Pour votre participation au projet de recherche, vous recevrez une image de votre cerveau.

PARTICIPATION VOLONTAIRE ET POSSIBILITÉ DE RETRAIT

Votre participation à ce projet de recherche est volontaire. Vous êtes donc libre de refuser d'y participer. Vous pouvez également vous retirer de ce projet à n'importe quel moment, sans avoir à donner de raisons, en faisant connaître votre décision au chercheur responsable du projet ou à l'un des membres du personnel affecté au projet.

Le chercheur responsable du projet de recherche, le Comité mixte d'éthique de la recherche du RNQ, l'organisme subventionnaire peuvent mettre fin à votre participation, sans votre consentement, si de nouvelles découvertes ou informations indiquent que votre participation au projet n'est plus dans votre intérêt, si vous ne respectez pas les consignes du projet de recherche ou s'il existe des raisons administratives d'abandonner le projet.

Si vous vous retirez ou êtes retiré du projet, l'information déjà obtenue dans le cadre de ce projet sera conservée aussi longtemps que nécessaire pour rencontrer les exigences réglementaires.

Toute nouvelle connaissance acquise durant le déroulement du projet qui pourrait affecter votre décision de continuer d'y participer vous sera communiquée sans délai verbalement et par écrit.

RETOUR D'INFORMATION ET AUTORISATION DE TRANSMETTRE LES RÉSULTATS

Les scans de recherche ne font pas l'objet d'un examen neuroradiologique. Cependant, l'examen d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle peut mettre en évidence des problèmes jusque-là ignorés. C'est pourquoi, en présence de toute particularité dans les scans, vous serez invité à passer un nouvel examen avec un appareil de 1.5 teslas pour vérification. Advenant, la confirmation d'une anomalie, un neurologue transmettra ces données à votre médecin traitant ou vous assurera un suivi.

CONFIDENTIALITÉ

Durant votre participation à ce projet de recherche, le chercheur responsable du projet ainsi que son personnel recueilleront et consigneront dans un dossier de recherche les renseignements vous concernant. Seuls les renseignements nécessaires à la bonne conduite du projet de recherche seront recueillis.

Ces renseignements comprennent les résultats de tous les tests que vous aurez à faire lors de ce projet de recherche. Votre dossier comprend aussi d'autres renseignements tels que votre nom, votre sexe, votre date de naissance, votre origine ethnique, de même que la moyenne scolaire obtenue lors de vos cours au niveau collégial et au niveau universitaire.

Tous ces renseignements recueillis au cours du projet de recherche demeureront strictement confidentiels dans les limites prévues par la loi. Afin de préserver votre identité et la confidentialité de ces renseignements, vous ne serez identifié que par un numéro de code. La clé du code reliant votre nom à votre dossier de recherche sera conservée par le chercheur responsable du projet de recherche dans un lieu sécuritaire.

Le chercheur responsable utilisera les données du projet de recherche à des fins de recherche dans le but de répondre aux objectifs scientifiques du projet de recherche décrits dans le formulaire d'information et de consentement. Vos renseignements personnels seront détruits cinq ans après la fin du projet de recherche.

Les données du projet de recherche pourront être publiées dans des revues médicales ou partagées avec d'autres personnes lors de discussions scientifiques. Aucune publication ou communication scientifique ne renfermera quoi que ce soit qui puisse permettre de vous identifier. Également, les données du projet pourraient servir pour d'autres analyses reliées au projet ou pour l'élaboration de projets de recherche futurs.

À des fins de surveillance et de contrôle, votre dossier de recherche pourra être consulté par une personne mandatée par le comité mixte d'éthique de la recherche du Regroupement Neuroimagerie/Québec, par une personne mandatée par le

ministre de la Santé et des Services sociaux ou par des organismes gouvernementaux mandatés par la loi. Toutes ces personnes et ces organismes adhèrent à une politique de confidentialité.

À des fins de protection, notamment afin de pouvoir communiquer avec vous rapidement, vos noms et prénoms, vos coordonnées et la date de début et de fin de votre participation au projet seront conservés pendant un an après la fin du projet dans un répertoire maintenu par le chercheur responsable.

Vous avez le droit de consulter votre dossier de recherche pour vérifier l'exactitude des renseignements recueillis aussi longtemps que le chercheur responsable du projet de recherche, l'établissement ou l'institution de recherche détiennent ces informations. Cependant, afin de préserver l'intégrité scientifique du projet de recherche, vous n'aurez accès à certaines de ces informations qu'une fois l'étude terminée.

FINANCEMENT

Pour effectuer cette recherche, le chercheur responsable du projet a reçu une subvention du Conseil de recherches en sciences humaines du Canada. Les sommes reçues couvrent les frais reliés à cette recherche.

ACCÈS AUX CHERCHEURS

Si vous avez des questions concernant le projet de recherche ou si vous croyez que vous éprouvez un problème de santé relié à votre participation au projet de recherche, vous pouvez communiquer avec le chercheur responsable de l'étude, Monsieur Patrice Potvin au 514-987-3000, poste 1290.

PROCÉDURES EN CAS D'URGENCE MÉDICALE

Veuillez noter que l'Institut universitaire de gériatrie de Montréal n'est pas un centre hospitalier de soins de courte durée qui offre des services d'urgence et qui compte sur la présence sur place d'un médecin 24 heures sur 24. Par conséquent, advenant une condition médicale qui nécessiterait des soins immédiats, les premiers soins vous seraient dispensés par le personnel en place et des dispositions seraient prises afin de vous transférer, si nécessaire, aux urgences d'un hôpital avoisinant.

EN CAS DE PLAINTES

Pour tout problème concernant les conditions dans lesquelles se déroule votre participation à ce projet, vous pouvez, après en avoir discuté avec la personne responsable du projet, faire part de vos préoccupations à la responsable des plaintes de l'Institut universitaire de gériatrie de Montréal à l'adresse suivante :

Commissaire local aux plaintes et à la qualité des services, Institut universitaire de gériatrie de Montréal, 4565, chemin Queen-Mary, Montréal (Québec) H3W 1W5. Tél. : (514) 340-3517.

INFORMATION SUR LA SURVEILLANCE ÉTHIQUE

Le comité mixte d'éthique de la recherche du Regroupement Neuroimagerie/Québec a approuvé ce projet de recherche et s'assure du respect des règles éthiques durant tout le déroulement de la recherche. Pour toute information, vous pouvez rejoindre le secrétariat du Comité au numéro : (514) 340-2800, poste 3250.

Ce projet a également reçu l'approbation du Comité institutionnel d'éthique de la recherche avec des êtres humains de l'Université du Québec à Montréal (CIÉR). Si vous désirez obtenir des informations sur les responsabilités des chercheurs au plan de l'éthique de la recherche ou formuler une plainte, vous pouvez exposer votre situation auprès du Président du CIÉR, Joseph Josy Lévy. Il peut être joint par courriel à levy.joseph_josy@uqam.ca ou au numéro 514-987-3000, poste 7753.

CONSENTEMENT

Titre du projet de recherche : Étude des mécanismes cérébraux sous-tendant les processus de changement conceptuel en physique

CONSENTEMENT DU SUJET

J'ai pris connaissance du formulaire d'information et de consentement. Je reconnais qu'on m'a expliqué le projet, qu'on a répondu à mes questions et qu'on m'a laissé le temps voulu pour prendre une décision.

Je consens à participer à ce projet de recherche aux conditions qui y sont énoncées. Une copie signée et datée du présent formulaire d'information et de consentement m'a été remise.

Nom et signature du sujet de recherche
Date

SIGNATURE DE LA PERSONNE QUI A OBTENU LE CONSENTEMENT SI DIFFÉRENT DU CHERCHEUR RESPONSABLE DU PROJET DE RECHERCHE.

J'ai expliqué au sujet de recherche les termes du présent formulaire d'information et de consentement et j'ai répondu aux questions qu'il m'a posées.

Nom et signature de la personne qui obtient le consentement

Date

SIGNATURE ET ENGAGEMENT DU CHERCHEUR RESPONSABLE DU PROJET

Je certifie qu'on a expliqué au sujet de recherche les termes du présent formulaire d'information et de consentement, que l'on a répondu aux questions que le sujet de recherche avait à cet égard et qu'on lui a clairement indiqué qu'il demeure libre de mettre un terme à sa participation, et ce, sans préjudice.

Je m'engage, avec l'équipe de recherche, à respecter ce qui a été convenu au formulaire d'information et de consentement et à en remettre une copie signée au sujet de recherche.

Nom et signature du chercheur responsable du projet de recherche

Date

APPENDICE D – PARAMÈTRES D'ACQUISITION DES IMAGES FONCTIONNELLE ET STRUCTURELLES

Images fonctionnelles (T2*)	Appareil : Siemens TIM 3,0 T
	Temps de répétition = 2000 ms
	Temps d'écho = 30 ms
	« Flip angle » : 90 degrés
	Taille des voxels : 3 mm x 3 mm x 3 mm
	Ordre d'acquisition : « Ascending »
	Orientation des tranches : « AC-PC line » (« anterior commissure -
	posterior commissure »)
	Nombre de tranches : 33
	« Field of view » (FOY) : 192
	Résolution dans le plan (matrice) : 64 x 64
	Antenne de tête : 12 canaux
Images structurelles (T1)	Épaisseur des tranches : 3,0 mm
	Espace entre les tranches : 25 % (0,8 mm)
	Appareil : Siemens TIM 3,0 T
	Temps de répétition = 2300 ms
	Temps d'inversion = 900 ms (« inversion time »)
	Temps d'écho = 30 ms
	« Flip angle » : 9 degrés
	Taille des voxels : 1,0 x 1,0 x 1,2 mm
	Ordre d'acquisition : « interleaved »
	Orientation des tranches : sagittale
	Nombre de tranches : 160
	« Field of view » : 256
	Résolution dans le plan (matrice) : 240 x 256
	Antenne de tête : 12 canaux

RÉFÉRENCES

- Abimbola, I. O. (1988). The problem of terminology in the study of student conceptions in science. *Science Education*, 72, 175-184.
- Amaro, E., & Barker, G. J. (2006). Study design in fMRI: Basics principles. *Brain and Cognition*, 60, 220-232.
- Ashburner, J. (2012). SPM: A history. *NeuroImage*, 62(2), 791-800.
- Ashburner, J., & Friston, K. J. (2005). Unified segmentation. *NeuroImage*, 26(3), 839-851.
- Astolfi, J.-P., Peterfalvi, B., & Vérin, A. (2006). *Comment les enfants apprennent les sciences*. Paris : Retz.
- Ausubel, D., Novak, J., & Hanesian, H. (1968). *Educational psychology: A cognitive view*. New York : Holt, Rinehart & Winston.
- Babai, R., & Amsterdamer, A. (2008). The persistence of solid and liquid naive conceptions: A reaction time study. *Journal of Science Education and Technology*, 17(6), 553-559.
- Babai, R., Sekal, R., & Stavy, R. (2010). Persistence of the intuitive conception of living things in adolescence. *Journal of Science Education and Technology*, 19(1), 20-26.
- Bachelard, G. (1938). *La formation de l'esprit scientifique*. Paris : Vrin.
- Beaulieu, C., Plewes, C., Paulson, L. A., Roy, D., Snook, L., Concha, L., & Phillips, L. (2005). Imaging brain connectivity in children with diverse reading ability. *NeuroImage*, 25(4), 1266-1271.
- Belanger, M. (2008). *Du changement conceptuel à la complexification conceptuelle dans l'apprentissage des sciences*. Thèse de doctorat, Université du Québec à Montréal, Montréal.

- Bêty, M.-N. (2009). *Les principaux modèles de changement conceptuel et l'enseignement des sciences au primaire : état de la question*. Mémoire de maîtrise, Université de Montréal, Montréal.
- Billington, J., Baron-Cohen, S., & Wheelwright, S. (2007). Cognitive style predicts entry into physical sciences and humanities: Questionnaire and performance tests of empathy and systemizing. *Learning and Individual Differences*, 17(3), 260-268.
- Blumenfeld, R. S., & Ranganath, C. (2006). Dorsolateral prefrontal cortex promotes long-term memory formation through its role in working memory organization. *The Journal of Neuroscience*, 26(3), 916-925.
- Blumenfeld, R. S., Parks, C. M., Yonelinas, A. P., & Ranganath, C. (2011). Putting the pieces together: The role of dorsolateral prefrontal cortex in relational memory encoding. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 23(1), 257-265.
- Botvinick, M. (2007). Conflict monitoring and decision making: Reconciling two perspectives on anterior cingulate function. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 7(4), 356-366.
- Botvinick, M. M., Braver, T. S., Barch, D. M., Carter, C. S., & Cohen, J. D. (2001). Conflict monitoring and cognitive control. *Psychological Review*, 108(3), 624-652.
- Botvinick, M. M., Cohen, J. D., & Carter, C. S. (2004). Conflict monitoring and anterior cingulate cortex : an update. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(12), 539-546.
- Brown, D. E., & Hammer, D. (2008). Conceptual change in physics. In S. Vosniadou (Ed.), *International handbook of research on conceptual change* (pp.127-154). New York : Routledge.
- Buchsbaum, B. R., Greer, S., Chang, W.-L., & Berman, K. F. (2005). Meta-analysis of neuroimaging studies of the Wisconsin Card-Sorting task and component processes. *Human Brain Mapping*, 25(1), 35-45.
- Bush, G., Paul J. Whalen, P. J., Rosen, B., Jenike, M. A., McInerney, S. C., Rauch, S. L. (1998). The counting Stroop: an interference task specialized for functional neuroimaging - validation study with functional MRI. *Human Brain Mapping*, 6, 270-282.

- Cahill, L. (2006). Why sex matters for neuroscience. *Nature Reviews Neuroscience*, 7(6), 477-484.
- Carey, S. (2000). Science education as conceptual change. *Journal of Applied Developmental Psychology*, 21(1), 13-19.
- Carey, S. (2009). *The origin of concepts*. New York : Oxford University Press.
- Carter, C. S., Mintun, M., & Cohen, J. D. (1995). Interference and facilitation effects during selective attention: An H215O PET study of Stroop task performance. *NeuroImage*, 2(4), 264-272.
- Chambers, C. D., Garavan, H., & Bellgrove, M. A. (2009). Insights into the neural basis of response inhibition from cognitive and clinical neuroscience. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 33(5), 631-646.
- Chen, C.-Y., Muggleton, N. G., Tzeng, O. J. L., Hung, D. L., & Juan, C.-H. (2009). Control of prepotent responses by the superior medial frontal cortex. *NeuroImage*, 44(2), 537-545.
- Chikazoe, J., Konishi, S., Asari, T., Jimura, K., & Miyashita, Y. (2007). Activation of right inferior frontal gyrus during response inhibition across response modalities. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 19(1), 69-80.
- Chinn, C. A., & Samarapungavan, A. L. A. (2009). Conceptual change - multiple routes, multiple mechanisms: A commentary on Ohlsson (2009). *Educational Psychologist*, 44(1), 48-57.
- Confrey, J. (1990). A review of the research on student conceptions in mathematics, science, and programming. In C. B. Cazden (Ed.), *Review of research in education* (Vol. 16, pp. 3-56). Washington, NW : American Educational Research Association.
- Conseil de la science et de la technologie (2004). *La culture scientifique et technique : une interface entre les sciences, la technologie et la société*. Sainte-Foy : Gouvernement du Québec.
- Coq, G. (2003). *L'éloge de la culture scolaire*. Paris : Le Félin.
- Curtis, C. E., & D'Esposito, M. (2003). Persistent activity in the prefrontal cortex during working memory. *Trends in Cognitive Science*, 7(9), 415-423.

- De Neys, W. (2006a). Automatic–heuristic and executive–analytic processing during reasoning: Chronometric and dual-task considerations. *The Quarterly Journal of experimental Psychology*, 59(6), 1070-1100
- De Neys, W. (2006b). Dual processing in reasoning: Two systems but one reasoner. *Psychological Science*, 17(5), 428-433.
- De Neys, W., & Everaerts, D. (2008a). Developmental trends in everyday conditional reasoning: The retrieval and inhibition interplay. *Journal of Experimental Child Psychology*, 100, 252-253.
- De Neys, W., Glumicic, T. (2008b). Conflict monitoring in dual process theories of thinking. *Cognition*, 106, 1245–1299.
- De Neys, W., Vartanian, O., & Goel, V. (2008c). Smarter than we think: When our brains detect that we are biased. *Psychological Science*, 19(5), 483-489.
- De Neys, W., Cromheeke, S., & Osman, M. (2011). Biased but in doubt: Conflict and decision confidence. *PLoS ONE*, 6(1), 1-10.
- de Vecchi, G., & Giordan, A. (1994). *L'enseignement scientifique. Comment faire pour que ça marche?* Nice : Z'éditions.
- diSessa, A. A. (1988). Knowledge in pieces. In G. Forman & P. B. Pufall (Eds.), *Constructivisme in the Computer Age* (pp. 49-70). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- diSessa, A. A. (1993). Toward an epistemology of physics. *Cognition and Instruction*, 10(2-3), 105-225.
- diSessa, A. A. (2006). A history of conceptual change research: threads and fault lines. In R. K. Sawyer (Ed.), *Cambridge handbook of the learning sciences* (pp. 265-281). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- diSessa, A. A. (2008). A bird's-eye view of the "pieces" vs. "coherence" controversy (from the "pieces" side of the fence). In S. Vosniadou (Ed.), *International handbook of research on conceptual change* : Routledge
- diSessa, A. A., & Sherin, B. L. (1998). What changes in conceptual change? *International Journal of Science Education*, 20(10), 1155-1191.

- Duit, R., & Treagust, D. F. (2003). Conceptual change: a powerful framework for improving science teaching and learning. *International Journal of Science Education*, 25(6), 671-688.
- Dunbar, K. N., Fugelsang, J. A., & Stein, C. (2007). Do naïve theories ever go away? Using brain and behavior to understand changes in concepts. In M. C. Lovett & P. Shah (Eds.), *Thinking with Data: 33rd Carnegie Symposium on Cognition* (pp. 193-206). Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Evans, J. (2003) In two minds : Dual-process accounts of reasoning. *Trends in Cognitive Sciences*, 17(10), 454-60.
- Evans, J., & Curtis-Holmes, J. (2005). Rapid responding increases belief bias: Evidence for the dual-process theory of reasoning. *Thinking & Reasoning*, 11(4), 382-389
- Festinger, L. (1957). *A theory of cognitive dissonance*. Stanford: Stanford University Press.
- Friston, K., Williams, S., Howard, R., Frackowiak, R., & Turner, R. (1996). Movement related effects in fMRI time-series. *Magnetic Resonance in Medicine*, 35(3), 346-355.
- Fugelsang, J., & Dunbar, K. (2005). Brain-based mechanisms underlying complex causal thinking. *Neuropsychologia*, 43, 1204-1213.
- Garavan, H., Ross, T. J., Murphy, K., Roche, R. A. P., & Stein, E. A. (2002). Dissociable executive functions in the dynamic control of behavior: Inhibition, error detection, and correction. *NeuroImage*, 17, 1820-1829.
- Giordan, A. (1998). *Apprendre!* Paris : Éditions Belin.
- Giordan, A. (2002). Après Piaget, que peut-on dire sur le changement conceptuel. In R. M. J. Toussaint (Ed.), *Changement conceptuel et apprentissage des sciences, recherches et pratiques* (pp. 13-29). Montréal : Éditions Logiques.
- Giordan, A., & de Vecchi, G. (1987). *Les origines du savoir : des conceptions des apprenants aux concepts scientifiques* : Delachaux et Niestlé.

- Good, C. D., Johnsrude, I., Ashburner, J., Henson, R. N. A., Friston, K. J., & Frackowiak, R. S. J. (2001). Cerebral asymmetry and the effects of sex and handedness on brain structure: A voxel-based morphometric analysis of 465 normal adult human brains. *NeuroImage*, 14(3), 685-700.
- Grabner, R. H., Ansari, D., Koschutnig, K., Reishofer, G., Ebner, F., & Neuper, C. (2009). To retrieve or to calculate? Left angular gyrus mediates the retrieval of arithmetic facts during problem solving. *Neuropsychologia*, 47(2), 604-608.
- Grabner, R. H., Ansari, D., Reishofer, G., Stern, E., Ebner, F., & Neuper, C. (2007). Individual differences in mathematical competence predict parietal brain activation during mental calculation. *NeuroImage*, 38(2), 346-356.
- Grabner, R. H., Fink, A., Stipacek, A., Neuper, C., & Neubauer, A. C. (2004). Intelligence and working memory systems: evidence of neural efficiency in alpha band ERD. *Cognitive Brain Research*, 20(2), 212-225.
- Hebb, D. O. (1949). *The organization of behavior*. New York : Wiley.
- Heekeren, H. R., Marrett, S., Ruff, D. A., Bandettini, P. A., & Ungerleider, L. G. (2006). Involvement of human left dorsolateral prefrontal cortex in perceptual decision making is independent of response modality. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(26), 10023-10028.
- Houdé, O. (2004). *La psychologie de l'enfant*. Paris : Presses universitaires de France.
- Houdé, O., & Leroux, G. (2009). *Psychologie du développement cognitif*. Paris : Presses universitaires de France.
- Houdé, O., Pineau, A., Leroux, G., Poirel, N., Perchey, G., Lanoë, C., ... Mazoyer, B. (2011). Functional magnetic resonance imaging study of Piaget's conservation-of-number task in preschool and school-age children: A neo-Piagetian approach. *Journal of Experimental Child Psychology*, 110(3), 332-346.
- Houdé, O., Zago, L., Crivello, F., Moutier, S., Pineau, A., Mazoyer, B., & Tzourio-Mazoyer, N. (2001). Access to deductive logic depends on a right ventromedial prefrontal area devoted to emotion and feeling: Evidence from a training paradigm. *NeuroImage*, 14, 1486-1492.

- Houdé, O., Zago, L., Mellet, E., Moutier, S., Pineau, A., Mazoyer, B., & Tzourio-Mazoyer, N. (2000). Shifting from the perceptual brain to the logical brain: The neural impact of cognitive inhibition training. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12(5), 721-728.
- Huettel, S. A., Song, A. W., & McCarthy, G. (2004). *Functional magnetic resonance imaging*. Sunderland, USA: Sinauer Associates Inc.
- Joshua, S., & Dupin, J.-J. (1993). Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques. Paris : Presses universitaires de France.
- Kelemen, D., & Rosset, E. (2009). The human function compunction: Teleological explanation in adults. *Cognition*, 111(1), 138-143.
- Kelemen, D., Rottman, J., & Seston, R. (2012). Professional physical scientists display tenacious teleological tendencies: Purpose-based reasoning as a cognitive default. *Journal of Experimental Psychology: General*, Advance online publication.
- Kuhn, T. S. (1970). *La structure des révolutions scientifiques*. Paris : Flammarion.
- Kwon, Y.-J., & Lawson, A. E. (2000). Linking brain growth with the development of scientific reasoning ability and conceptual change during adolescence. *Journal of Research in Science Teaching*, 37(1), 44-62.
- Larochelle, M., & Désautels, J. (1992). *Autour de l'idée de science*. Québec : Presses de l'Université Laval.
- Lee, G., & Byun, T. (2011). An explanation for the difficulty of leading conceptual change using a counterintuitive demonstration: The relationship between cognitive conflict and responses. *Research in Science Education*, 1-23.
- Legendre, M.-F. (2002). *Le rôle du raisonnement qualitatif dans les processus de changement conceptuel et ses implications pour l'enseignement et la formation des enseignants*. In R. M. J. Toussaint (Dir.), *Changement conceptuel et apprentissage des sciences, recherches et pratiques* (pp. 177-201). Montréal : Éditions Logiques.

- Legendre, M.-F. (2007). Enseigner les sciences dans une double perspective de continuité et de rupture. In P. Potvin, M. Riopel & S. Masson (Dir.), *Regards multiples sur l'enseignement des sciences* (pp. 293-307). Sainte-Foy, Québec : Éditions MultiMondes.
- Legendre, R. (2005). *Dictionnaire actuel de l'éducation* (3^e éd.). Montréal : Guérin.
- Leung, H.-C., Skudlarski, P., Gatenby, J. C., Peterson, B. S., & Gore, J. C. (2000). An event-related functional MRI study of the Stroop color word interference task. *Cerebral Cortex*, 10(6), 552-560.
- Lie, C. H., Specht, K., Marshall, J. C., & Fink, G. R. (2006). Using fMRI to decompose the neural processes underlying the Wisconsin Card Sorting Test. *NeuroImage*, 30(3), 1038-1049.
- Liu, X. (2001). Synthesizing research on student conceptions in science. *International Journal of Science Education*, 23, 55-81.
- Lombrozo, T., Kelemen, D., & Zaitchik, D. (2007). Inferring design. *Psychological Science*, 18(11), 999-1006.
- MacDonald, A. W., Cohen, J. D., Stenger, V. A., & Carter, C. S. (2000). Dissociating the role of the dorsolateral prefrontal and anterior cingulate cortex in cognitive control. *Science*, 288, 1835-1838.
- Masnick, A. M., Valenti, S. S., Cox, B. D., & Osman, C. J. (2009). A multidimensional scaling analysis of students' attitudes about science careers. *International journal of science education*, 32(5), 653-667.
- Masson, S. (2012). *Étude des mécanismes cérébraux liés à l'expertise en électricité à l'aide de l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle*. Thèse de doctorat, Université du Québec à Montréal, Montréal.
- Masson, S., Potvin, P., Riopel, M., Brault Foisy, L.-M., & Lafortune, S. (2012). Using fMRI to study conceptual change: Why and how? *International Journal of Environmental and Science Education*, 7(1), 19-35.
- Menon, V., Adelman, N. E., White, C. D., Glover, G. H., & Reiss, A. L. (2001). Error-related brain activation during a Go/NoGo response inhibition task. *Human Brain Mapping*, 12(3), 131-143.

- Miller, E. K., & Cohen, J. D. (2001). An integrative theory of prefrontal cortex function. *Annual Review of Neuroscience*, 24(1), 167-202.
- Milner, B. (1963). Effects of different brain lesions on card sorting: The role of the frontal lobes. *Archives of Neurology*, 9(1), 90-100.
- Ministère de l'Éducation, Gouvernement du Québec. (2006). *Programme de formation de l'école québécoise : éducation préscolaire et enseignement primaire - Domaine de la science et de la technologie*. Québec : Ministère de l'Éducation.
- Ministère de l'Éducation, Gouvernement du Québec. (2006). *Programme de formation de l'école québécoise : éducation secondaire – Domaine des mathématiques, de la science et de la technologie*. Québec : Ministère de l'Éducation.
- Monchi, O., Petrides, M., Petre, V., Worsley, K., & Dagher, A. (2001). Wisconsin card sorting revisited: Distinct neural circuits participating in different stages of the task identified by event-related functional magnetic resonance imaging. *The Journal of Neuroscience*, 21(19), 7733-7741.
- Mortimer, E. F. (1995). Conceptual change or conceptual profile change? *Science & Education*, 4(3), 267-285.
- Murphy, P.K., & Alexander, P.A. (2008). The role of knowledge, beliefs, and interest in the conceptual change process: A synthesis and meta-analysis of the research. In S. Vosniadou (Ed.), *International handbook of research on conceptual change* (pp. 583–618). New York : Routledge.
- Nelson, J. K., Lizcano, R. A., Atkins, L., & Dunbar, K. (2007, November 17). Conceptual judgments of expert vs. novice chemistry students: an fMRI study. Paper presented at the 48th Annual meeting of the Psychonomic Society, Hyatt Regency Hotel Long Beach, California.
- Neubauer, A. C., Fink, A., & Schrausser, D. G. (2002). Intelligence and neural efficiency : The influence of task content and sex on the brain: IQ relationship. *Intelligence*, 30(6), 515-536.
- Nussbaum, J., & Novick, S. (1982). Alternative frameworks, conceptual conflict and accommodation: Toward a principled teaching strategy. *Instructional Science*, 11(3), 183-200.

- OCDE. (2002). *Comprendre le cerveau : vers une nouvelle science de l'apprentissage*. Paris : Éditions de l'OCDE.
- OCDE. (2007a). *Comprendre le cerveau : naissance d'une nouvelle science de l'apprentissage*. Paris : Éditions de l'OCDE.
- OCDE. (2007b). *PISA 2006 Les compétences en sciences, un atout pour réussir*. Paris : Éditions de l'OCDE.
- OCDE. (2008). *Encouraging student interest in science and technology studies*. Paris : Éditions de l'OCDE.
- Ohlsson, S. (2009). Resubsumption: A possible mechanism for conceptual change and belief revision. *Educational Psychologist*, 44(1), 20-40.
- Pardo, J. V., Pardo, P. J., Janer, K. W., & Raichle, M. E. (1990). The anterior cingulate cortex mediates processing selection in the Stroop attentional conflict paradigm. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 87(1), 256-259.
- Periago, M. C., & Bohigas, X. (2005). A study of second-year engineering students' alternative conceptions about electric potential, current intensity and Ohm's law. *European Journal of Engineering Education*, 30(1), 71-80.
- Petitto, L.-A., & Dunbar, K. (2004). New findings from educational neuroscience on bilingual brains, scientific brains, and the educated mind. In K. Fisher & T. Katzir (Eds.), *Building usable knowledge in mind, brain, & education*. Cambridge : Cambridge University Press.
- Piaget, J. (1974). *La psychologie de l'intelligence*. Paris : Armand Colin.
- Planinic, M., Boone, W. J., Krsnik, R., & Beilfuss, M. L. (2006). Exploring alternative conceptions from Newtonian dynamics and simple DC circuits: Links between item difficulty and item confidence. *Journal of Research in Science Teaching*, 43(2), 150-171.
- Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W., & Gertzog, W. A. (1982). Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change. *Science Education*, 66, 211-227.

- Potvin, P. (1998). *État de la question de la problématique du conflit cognitif en sciences au secondaire*. Mémoire de maîtrise non publié, Université du Québec à Montréal, Montréal.
- Potvin, P. (2011). *Manuel d'enseignement des sciences et de la technologie*. Montréal : Éditions MultiMondes.
- Rogers, B. P., Carew, J. D., & Meyerand, M. E. (2004). Hemispheric asymmetry in supplementary motor area connectivity during unilateral finger movements. *NeuroImage*, 22(2), 855-859.
- Rowe, J. B., Toni, I., Josephs, O., Frackowiak, S. J. R., & Passingham, R. E. (2000). The prefrontal cortex: Response selection or maintenance within working memory?, *Science*, 288, 1656-1660.
- Samson, G. (2002). *L'importance accordée aux conceptions de l'élève dans l'enseignement des sciences au secondaire*. In R. M. J. Toussaint (Ed.), *Changement conceptuel et apprentissage des sciences, recherches et pratiques* (pp. 97-115). Montréal : Éditions Logiques.
- Severens, E., Kühn, S., Hartsuiker, J. R., & Brass, M. (2012). Functional mechanisms involved in the internal inhibition of taboo words. *SCAN*, 7, 431-435.
- Siegler, R. (2000). *Intelligence et développement de l'enfant*. Bruxelles : De Boeck.
- Siegler, R. (2001). *Enfant et raisonnement*. Bruxelles : De Boeck.
- Shtulman, A., & Valcarcel, J. (2012). Scientific knowledge suppresses but does not supplant earlier intuitions. *Cognition*, 124(2), 209-215.
- Solomon, J. (1983). Learning about energy: How pupils think in two domains. *European Journal of Science Education*, 5(1), 49- 59.
- Solomon, J. (1984). Prompts, cues and discrimination: The utilization of two separate knowledge systems. *European Journal of Science Education*, 6(3), 277 - 284.
- Stavy, R., & Babai, R. (2010). Overcoming intuitive interference in mathematics: Insights from behavioral, brain imaging and intervention studies. *ZDM*, 42(6), 621-633.

- Stavy, R., & Tirosh, D. (2000). *How students (mis-) understand science and mathematics: Intuitive rules*. New York : Teachers College Press.
- Stroop, J. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology: General*, 18, 643-662.
- Tanji, J. (1994). The supplementary motor area in the cerebral cortex. *Neuroscience Research*, 19(3), 251-268.
- Tanji, J., & Shima, K. (1994). Role for supplementary motor area cells in planning several movements ahead. *Nature*, 371, 413-416.
- Thouin, M. (1996). *Notions de culture scientifique et technologique : concepts de base, percées historiques et conceptions fréquentes*. Sainte-Foy, Québec : Éditions MultiMondes.
- Thouin, M. (2004a). *Enseigner les sciences et la technologie au préscolaire et au primaire*. Sainte-Foy, Québec : Éditions MultiMondes.
- Thouin, M. (2004b). *Explorer l'histoire des sciences et des techniques*. Québec, QC : Éditions MultiMondes.
- Tirosh, D., & Stavy, R. (1999). Intuitive rules : A way to explain and predict students' reasoning. *Educational Studies in Mathematics*, 38(1), 51-66.
- Toussaint, R. (1991). Les représentations préscientifiques chez des adolescents. *Revue de l'Université de Moncton*, 23(1/2), 29-49.
- Toussaint, R. (2001). *Changement conceptuel et apprentissage des sciences*. Outremont : Éditions Logique.
- Toussaint, R. (2002). *Dis, Archimède! Comment ça flotte? Changements conceptuels et apprentissage de systèmes complexes*. In R. M. J. Toussaint (Ed.), *Changement conceptuel et apprentissage des sciences, recherches et pratiques* (pp. 97-115). Montréal : Éditions Logiques.
- Tsai, C.-C., & Wen, M. L. (2005). Research and trends in science education from 1998 to 2002: a content analysis of publication in selected journals. *International Journal of Science Education*, 27(1), 3-14.

- Tsujii, T., & Watanabe, S. (2010). Neural correlates of belief-bias reasoning under time pressure: A near-infrared spectroscopy study. *NeuroImage*, 50, 1320-1326.
- Tsujii, T., Sakatani, K., Masuda, S., Akiyama, T., & Watanabe, S. (2011). Evaluating the roles of the inferior frontal gyrus and superior parietal lobule in deductive reasoning: An rTMS study. *NeuroImage*, 58, 640-646.
- Turkeltaub, P. E., Gareau, L., Flowers, D. L., Zeffiro, T. A., & Eden, G. F. (2003). Development of neural mechanisms for reading. *Nature Neuroscience*, 6(7), 767-773.
- van den Wildenberg, W. P. M., & van der Molen, M. W. (2004). Developmental trends in simple and selective inhibition of compatible and incompatible responses. *Journal of Experimental Child Psychology*, 87(3), 201-220.
- Viennot, L. (1979). Spontaneous reasoning in elementary dynamics. *European Journal of Science Education*, 1(2), 205-221.
- Viennot, L. (2008). Didactique, épistémologie et histoire des sciences. Paris : Presses universitaires de France.
- Vosniadou, S. (1994). Capturing and modeling the process of conceptual change. *Learning and Instruction*, 4(1), 45-69.
- Vosniadou, S. (2008). Conceptual change research : an introduction. In S. Vosniadou (Ed.), *International Handbook of Research on Conceptual Change* (pp. xiii-xxviii). New York : Routledge.
- Vosniadou, S., Ioannides, C., Dimitrakopoulou, A., & Papademetriou, E. (2001). Designing learning environments to promote conceptual change in science. *Learning and Instruction*, 11(4-5), 381-419.
- Wandersee, J. H., Mintzes, J. J., & Novak, J. D. (1994). Research on alternative conceptions in science. In D. L. Gabel (Ed.), *Handbook of research on science teaching and learning* (pp. 177-210). New York : Macmillan.
- Ward, J. (2010). *The student's guide to cognitive neuroscience: Second edition*. New York : Psychology Press.

- Yoncheva, Y. N., Blau, V., Maurer, U. et McClelland, B. D. (2010). Attentional focus during learning impacts N170 ERP responses to an artificial script. *Developmental Neuropsychology*, 35(4), 423-445.
- Zaitchik, D., & Solomon, G. E. A. (2008). Animist thinking in the elderly and in patients with Alzheimer's disease. *Cognitive Neuropsychology*, 25(1), 27-37.